



Eritrina  
Servicio Geológico Colombiano  
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

# Cobalto

Álvaro Murillo Rodríguez

**Citación:** Murillo, Á. (2019). Cobalto. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El cobalto (Co) y los minerales que lo contienen son de interés estratégico<sup>1</sup> en Estados Unidos, Canadá, Alemania, República de Sudáfrica, Australia y Reino Unido. En Estados Unidos se cataloga, además, como crítico,<sup>2</sup> porque solo produce 3200 t (incluye minería y reciclaje) e importa 11.500 t para atender sus necesidades industriales (USGS, 2016). Es vital para la vida animal (humana y no humana) por ser el componente esencial de la vitamina B<sub>12</sub>.

El contenido promedio de cobalto en rocas y minerales de la corteza terrestre es bajo, del orden de 20 ppm (Rubio Navas, 2003). En la actualidad, los países productores, en orden de importancia, son: República Democrática del Congo, China, Canadá, Rusia, Australia, Zambia, Filipinas y Cuba (USGS, 2016).

El uso del cobalto como pigmento es antiquísimo y se remonta a los inicios de la civilización humana en Mesopotamia, donde se han encontrado sustancias minerales de cobalto en la elaboración de objetos de vidrio y cerámica; también en tumbas funerarias de Egipto, hace aproximadamente 2300 años; en objetos de la república y del Imperio Romano de Occidente y de la dinastía Ming de China entre 1368 y 1644. En la actualidad el uso principal es industrial, en el campo de las aleaciones, superaleaciones, aceros especiales y baterías.

El cobalto obtiene su nombre del término alemán *kobalt*, voz derivada de *kobold* (duende), llamado así por los mineros de Sajonia en la Edad Media, porque su presencia en las minas de plata y de cobre causaba problemas de toxicidad (Aguilar Malavia, 1999). Este elemento fue identificado por el médico, investigador, químico y mineralogista sueco Jorge Brandt en el periodo 1735 a 1737, quien

descubrió sus propiedades de ser atraído por un imán y de dar el color azul a los objetos de vidrio y de cerámica de las antiguas civilizaciones, en vez del bismuto, elemento al cual se le atribuía esa propiedad.

Olof Bergman estableció en 1780 su posición en el sistema periódico. El número atómico del cobalto es 27, su símbolo químico Co, su masa atómica relativa 58.9332 g, y es un metal no radiactivo en la naturaleza, a diferencia del isótopo Co<sup>60</sup> que es inestable y radiactivo, y producido por el hombre.

## 1. Usos

El empleo del cobalto como metal se inicia en aplicaciones de aceros de alta velocidad de corte, cuando Elwood Haynes, en 1907, patentó el producto Stellite® en Estados Unidos (patente 873745) para las aleaciones cobalto-cromo (Cobalt Development Institute, 2017), por sus características de resistencia a la corrosión, abrasión y descamación en la superficie.

El gran desarrollo de aleaciones magnéticas con base de cobalto lo iniciaron en 1920 las compañías Saito y Honda de Japón, cuando publicaron los resultados obtenidos en aceros fabricados con este metal, y en 1930 la compañía Mishima, en lo referente al magnetismo permanente adquirido por los productos de hierro, aluminio y níquel (Álvarez, 1987).

En 1936 Austenal desarrolla el Vitallium para prótesis dentales (por sus propiedades de elasticidad e inalterabilidad); en 1948 se inicia la aplicación del isótopo radiactivo Co<sup>60</sup> o cobalto 60 en el diagnóstico y la terapéutica de enfermedades oncológicas (cobaltoterapia), y en 1958 es empleado en la esterilización de utensilios quirúrgicos, desinfección de residuos hospitalarios y tratamiento de alimentos perecederos (Cobalt Development Institute, 2017).

Durante la Segunda Guerra Mundial se crearon las aleaciones Alnico-hierro (Al-Ni-Co-Fe) y luego las de

<sup>1</sup> Un mineral estratégico contiene un elemento químico que interviene en aplicaciones militares, industriales y civiles, y es de urgente necesidad e imprescindible utilización en casos de emergencia nacional. Cada país define qué minerales son estratégicos.

<sup>2</sup> Un mineral crítico, además de ser estratégico, es aquel que no existe en el país, es escaso o es limitada la producción nacional del elemento químico que se obtiene de su procesamiento para atender la demanda interna en situación normal o de emergencia.

Fe-Co-Mo, Fe-Ni-Co-Mn, Fe-Ni-Cu-Co y Co-Pt. Recientemente se desarrollaron las aleaciones magnéticas de baja intensidad (imanes blandos), con base en Fe-Ni-Co y Fe-Co-V, que se usan en “pequeños motores, transformadores estáticos o cintas magnéticas de grabación de imagen y sonido” (Rubio Navas, 2003). Las aleaciones de varios componentes basadas en cobalto, relacionadas con sus cualidades de adherencia, sellado y aislamiento, permiten uniones vidrio-metal de gran utilidad en la producción de dispositivos eléctricos o electrónicos (tubos de vacío, rectificadores).

A partir de 1994 se desarrolla uno de los usos más extendidos del cobalto en aleaciones con Ni/Cd y con Li para la fabricación de pilas o baterías recargables (Cobalt Development Institute, 2017). El empleo del cobalto en

la fabricación de pinturas, esmaltes, barnices, pigmentos inorgánicos y tintas; en los procesos de catálisis de petróleo y fabricación de productos de plástico; en la elaboración de combustibles sintéticos, lubricantes, gomas, decolorantes, oxidantes y en el esmalte de cobalto, es notable y alcanza el 25 % del total producido de cobalto. En el 2003 el cobalto, como materia prima, se usó más como metal y su principal aplicación fue en la fabricación de superaleaciones de Ni/Co/Fe (tabla 1).

El cobalto es un componente fundamental de la vitamina cobalamina o vitamina B<sub>12</sub>, esencial en los seres vivos, la cual interviene en el metabolismo y en la producción de glóbulos rojos en la sangre. La deficiencia de cobalto en los organismos vivos está acompañada de anemia; no obstante, su ingestión excesiva es tóxica.

**Tabla 1.** Usos del cobalto como materia prima y campo de aplicación

Usos (%)	Materia prima	Campo de aplicación
26	Cobalto metal	Superaleaciones Ni/Co/Fe
14.3	Polvo fino y extrafino de cobalto	Herramientas de metal duro y diamante para corte, fresado y pulimentado
12	Óxido de cobalto y, en menor medida, en sulfato, hidróxido o carbonato de cobalto	Productos colorantes para vidrios, esmaltes, plásticos, cerámica, pinturas o tejidos
9.8	Cobalto metal, polvo de cobalto, reciclados de aleaciones de cobalto	Imanes cerámicos, cintas u otros soportes para grabación de sonido y video
9.4	Compuestos químicos de cobalto	Adhesivos para gomas y neumáticos; jabones, secativos para pinturas; barnices, lacas, tintas, otros productos
8.5	Sales, acetatos y otros	(%) Catálisis industrial
	Sales de cobalto (carbonato (CoCO <sub>3</sub> ), sulfato (CoSO <sub>4</sub> •H <sub>2</sub> O), nitrato (Co (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	(4.0) Proceso Comox
	Acetato de cobalto	(3.3) Producción de terileno
	Sales de cobalto (carbonato, sulfato, nitrato)	(1.0) Proceso Oxo
	Cobalto metal, sales de cobalto	(0.2) Otros procesos
7.5	Cobalto metal en polvo, hidróxido de cobalto Co(OH) <sub>2</sub> , LiCoO <sub>2</sub>	Baterías o acumuladores eléctricos de tipo metal-hidruro (radio, telefonía celular o móvil, informática, automotriz, industria aeroespacial)
7	Cobalto metal, polvo de cobalto, reciclados de aleaciones de cobalto	Metal duro y otras aleaciones
5	Sulfato de cobalto, preferentemente, pero también carbonato e hidróxido	Baños electrolíticos, ánodos de cobalto, cobaltado superficial de cobre o acero

Fuente: Rubio Navas (2003)

El mayor consumo de cobalto en aleaciones se debe a la gama de cualidades físicas que adquieren los productos, desde un alto grado de ductilidad cuando se emplea con Ni, Mn, Ti, hasta un alto grado de rigidez con Cr, Mo, Si, W, pasando por una alta resistencia al desgaste y a la corrosión a altas temperaturas (800 °C) con Ni, Cr, Mo, W,

C, Si, Fe. Esta última superaleación es fundamental en la industria aeronáutica (fuselaje, turbo-compresores para motores) y en la construcción de turbinas de vapor o de gas (Rubio Navas, 2003), donde es irremplazable el cobalto.

Con el pasar del tiempo, los usos del cobalto han cambiado; se estima que desde el 2014 la demanda mundial de

cobalto en aplicaciones químicas alcanzó el 62 % y el 38 % restante corresponde a las aplicaciones metalúrgicas. En el futuro, el uso de cobalto en aplicaciones químicas continuará aumentando como resultado de la fuerte y creciente demanda de baterías recargables. Esta tendencia está muy marcada por el comportamiento de China, líder mundial en consumo de cobalto, donde cerca del 75 % de dicho consumo es usado por la industria de baterías.

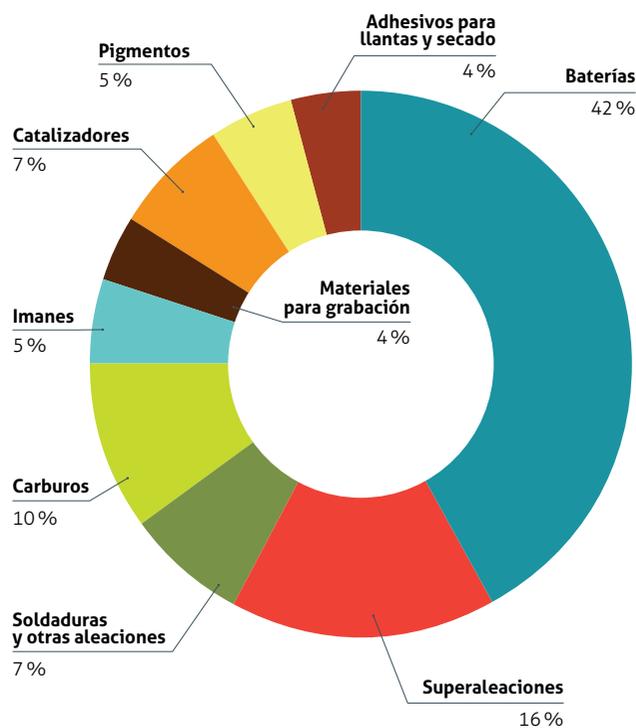
Las perspectivas actuales de utilización se orientan, por un lado, a las aleaciones de cobalto-cerámicas para la fabricación de componentes de vehículos aeroespaciales, estaciones orbitales, recubrimientos de hornos de altas temperaturas y cámaras de combustión de reactores, baterías y catalizadores y, por otro lado, al incremento de la gama de productos de cobalto en el automóvil (pinturas y autopartes), la electrónica (memoria en disco y circuitos), llantas y cauchos, fibras sintéticas, aditivos para gasolinas, lubricantes y grasas, entre otros productos (tabla 2 y figura 1).

**Tabla 2.** Demanda de cobalto por usos, 2014

Demanda por uso final	(%)
Baterías	42
Superalcaciones	16
Catalizadores	7
Carburos	10
Pigmentos	5
Adhesivos para llantas y secado	4
Soldaduras y otras aleaciones	7
Imanes	5
Materiales para grabación	4

Fuente: Cobalt Development Institute (2017)

Es notable el avance registrado entre 1986 y el 2014 en el uso del cobalto para la producción de baterías. En 1986 se desconocía su empleo como insumo para dicho fin (Álvarez, 1987) y, en ese entonces, el primer lugar lo ocupaba su utilización en las superaleaciones; en los quince años siguientes el uso del cobalto evolucionó hasta llegar, en el 2014, a ser utilizado mayoritariamente en la industria de las baterías, relegando su uso en las superaleaciones, de lejos, al segundo lugar.



**Figura 1.** Demanda de cobalto por usos, 2014

Fuente: Cobalt Development Institute (2017)

## 2. Ambiente geológico

El cobalto (Co) se encuentra naturalmente en más de setenta especies minerales; no existe en la Tierra como metal libre y los hallazgos en este estado están asociados a cantidades mínimas detectables en la fase metálica de los meteoritos. El contenido de cobalto en las rocas y minerales de la litosfera ha sido establecido en 20 ppm (Rubio Navas, 2003) y se halla asociado a rocas máficas y ultramáficas. El cobalto, junto con el níquel y el cromo, es indicativo de rocas máficas. Se obtiene como subproducto en la explotación de las minas de níquel y cobre, principalmente, y también de hierro, cromo, plomo, zinc, uranio y magnesio.

### 2.1. Características

El cobalto es un metal de transición del grupo 9, periodo 4, de la clasificación periódica de los elementos, que incluye al hierro y al níquel; es dúctil y maleable, presenta brillo lustroso, color plateado; tiene una densidad media a 25 °C de 8.85 g/cm<sup>3</sup>, punto de ebullición a 2800 ± 50 °C, punto de fusión a 1495 °C y se encuentra en la forma estable de cobalto 59 (Co<sup>59</sup>). El cobalto 60, Co<sup>60</sup>, es el isótopo más importante, el cual tiene una vida media (t<sub>1/2</sub>) de 1925.1 días (aproximadamente 5 años, 100 días).

Las siguientes son algunas de las características geoquímicas del cobalto: a temperatura ambiente, es estable en el aire; solo se oxida cuando se calienta y se quema al rojo blanco formando  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ; su solubilidad depende del pH, por tanto, en suelos ácidos, se produce un mayor deslavado y está ligado, fundamentalmente, a los óxidos de manganeso y hierro, de modo que solo una pequeña parte del cobalto permanece libre y, por tanto, móvil.

En la revisión de la geoquímica de este elemento, adelantada por Hamilton (1994), se postula que el comportamiento geoquímico del cobalto por lo general despliega propiedades calcófilas y siderófilas; su concentración en los sedimentos se controla principalmente por reacciones de adsorción<sup>3</sup> y coprecipitación en presencia de minerales de óxidos de hierro y de manganeso. Artificialmente se han creado 32 radioisótopos que tienen número de masa comprendidos entre el 48 y el 75, la mayoría con vida media promedio de horas o fracciones de segundo, con excepción del cobalto 59, variedad estable; los isótopos cobalto 56, 57, 58, con duraciones de días y cobalto 60, de años.

El radio iónico del Co es  $0.72\text{Å}^4$  para  $\text{Co}^{2+}$  y  $0.63\text{Å}$  para  $\text{Co}^{3+}$ , estrechamente relacionados con los radios iónicos del  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , del  $\text{Fe}^{3+}$  y del  $\text{Mn}^{4+}$  (Álvarez, 1987). Por tanto, en los estadios tempranos de los procesos magmáticos, el  $\text{Co}^{2+}$  sustituye al  $\text{Fe}^{2+}$  y al  $\text{Mg}^{2+}$ ; por ello se encuentra enriquecido en las rocas ígneas máficas en relación con las félsicas. También puede estar asociado a los sulfuros de hierro pirita, arsenopirita y pirrotita, y en los minerales accesorios de los óxidos, como la magnetita (Wedephol, 1995).

En la tabla 3 se ilustra el contenido promedio de cobalto en ppm, en la corteza terrestre (Reimann y de Caritat, 1998).

**Tabla 3.** Contenido promedio de cobalto en la corteza terrestre (ppm)

Tipo de roca	Contenido de Co (ppm)
Promedio corteza continental	24-29
Corteza continental superior	11.6-10.0
Rocas ultramáficas	110
Rocas basálticas	45
Rocas graníticas	4
Areniscas	0.3
Grawuaca	15
Shale, esquistos	20
Caliza	0.1
Carbón	10

Fuente: Reimann y de Caritat (1998)

<sup>3</sup> La incorporación y adhesión de un gas, un líquido o una sustancia disuelta a una fina capa de moléculas de la superficie de un sólido.

<sup>4</sup> Unidad de medida Ångstrom, equivalente a la diez mil millonésima parte del metro.

El cobalto se encuentra en 61 especies minerales de las siguientes clases mineralógicas: sulfatos, carbonatos, arseniatos, cromatos, vanadatos, silicatos, tiocianatos, sulfuros, arseniuros, sulfoarseniuros, seleniuros, selenitos, antimoniuros, telururos y óxidos; sin embargo, tan solo 14 de ellos son los minerales de mena donde el cobalto es el elemento principal (tabla 4). Entre los minerales restantes que poseen cobalto algunos son de rara ocurrencia: esmaltita  $(\text{Co},\text{Ni})\text{As}_{2-2.5}$ , cobaltita  $(\text{Co},\text{Fe})\text{AsS}$  y linneíta  $\text{Co}^{+2}\text{Co}^{+3}_2\text{S}_4$ . Otros, como la arsenopirita, cobaltopentlandita, cobalto pirita o cobalto-níquel pirita, pirita cobaltífera y pirrotina pueden tener concentraciones de cobalto que los conviertan en minerales menas de Co.

La Cobaltita y Eritrita (figura 2), que es un sulfuro compuesto por cobalto, arsénico, azufre, hierro y cantidades variables de níquel. Es común encontrarlo con aritrina (arseniato de cobalto hidratado) producto de la meteorización, su color rojo es muy característico, tanto como los cristales aciculares (flor de cobalto).



**Figura 2.** Cobaltita (arriba), fórmula química:  $\text{CoAsS}$ . Eritrita (abajo), fórmula Química  $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ .

Fuente: Servicio Geológico Colombiano.  
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

**Tabla 4.** Principales minerales de mena del cobalto

Mineral	Clase mineral	Fórmula química	Porcentajes de cobalto y otros elementos		
			Co	S	As
Heterogenita	Óxido	CoO(OH)	64.1	-	-
Linneíta	Sulfuro	Co <sup>+2</sup> Co <sup>+3</sup> S <sub>4</sub>	57.9	42.1	-
Esferocobaltita/cobaltocalcita	Carbonato	CoCO <sub>3</sub>	49.6	-	-
Carrollita	Sulfuro	CuCo <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	38.7	41.1	-
Cobaltina	Sulfoarseniuro	CoAsS	35.5	19.3	45.2
Asbolana	Óxido	m(Co, Ni)O.MnO <sub>2</sub> .nH <sub>2</sub> O	4.0-35.0	-	-
Tirolita	Arseniato	Ca(Co <sub>3</sub> , Co <sub>5</sub> )(AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	35.0	-	-
Eritrina	Arseniato	3CoO.As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .8H <sub>2</sub> O	29.5	-	25.0
Cloantita	Arseniuro	CoAs <sub>2</sub> ; {(Ni, Co)As <sub>2</sub> }	28.3	-	71.7
Esmaltina	Arseniuro	{(Co, Fe,Ni)As <sub>2</sub> }; {(Co, Fe,Ni)As <sub>3</sub> }	28.2	-	71.8
Safflorita	Arseniuro	CoAs <sub>2</sub> ; {(Co, Fe)As <sub>2</sub> }	28.0	-	72.08
Siegenita	Sulfuro	(Co, Ni) <sub>3</sub> S <sub>4</sub>	26.0	-	-
Skutterudita	Arseniuro	CoAs <sub>3</sub>	20.8	-	79.2
Glaucodoto	Sulfoarseniuro	(Co, Fe)AsS	12.0-31.6	-	-
Roselita	Arseniato	Ca <sub>2</sub> (Co, Mg)(AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	10.0-35.0	-	-

Fuente: Barthelmy (2007); Rubio Navas (2003); Álvarez (1987)

## 2.2. Tipo de depósito

Los minerales de cobalto se hallan estrechamente ligados geoquímicamente a los minerales de cobre, níquel, manganeso, hierro, plata, zinc y de otros metales. Por tanto, los depósitos de cobalto se encuentran clasificados en los yacimientos típicos de estos metales. De las clasificaciones de estos depósitos relacionados con el cobalto, que tienen en cuenta el ambiente de formación, se sigue en este texto la de Rubio Navas, quien los agrupa en:

- Depósitos ortomagmáticos, subdivididos en complejos plutónicos básicos y cuerpos máficos y ultramáficos estratiformes con sulfuros masivos.
- Depósitos hidrotermales y de metasomatismo de contacto.
- Depósitos de ambiente sedimentario que reúnen a los estratiformes volcano-sedimentarios, los lateríticos, los sedimentarios de concentración residual y los de precipitación química en los pisos marinos actuales, correspondientes a nódulos de manganeso, costras de cobalto y sulfuros metalíferos exhalativos.

El Servicio Geológico Británico los clasifica en depósitos estratiformes de cobre, depósitos de sulfuros de níquel-cobre, depósitos de sulfoarseniuros de plata-cobalto y lateritas níquelíferas. Algunos de los depósitos mencio-

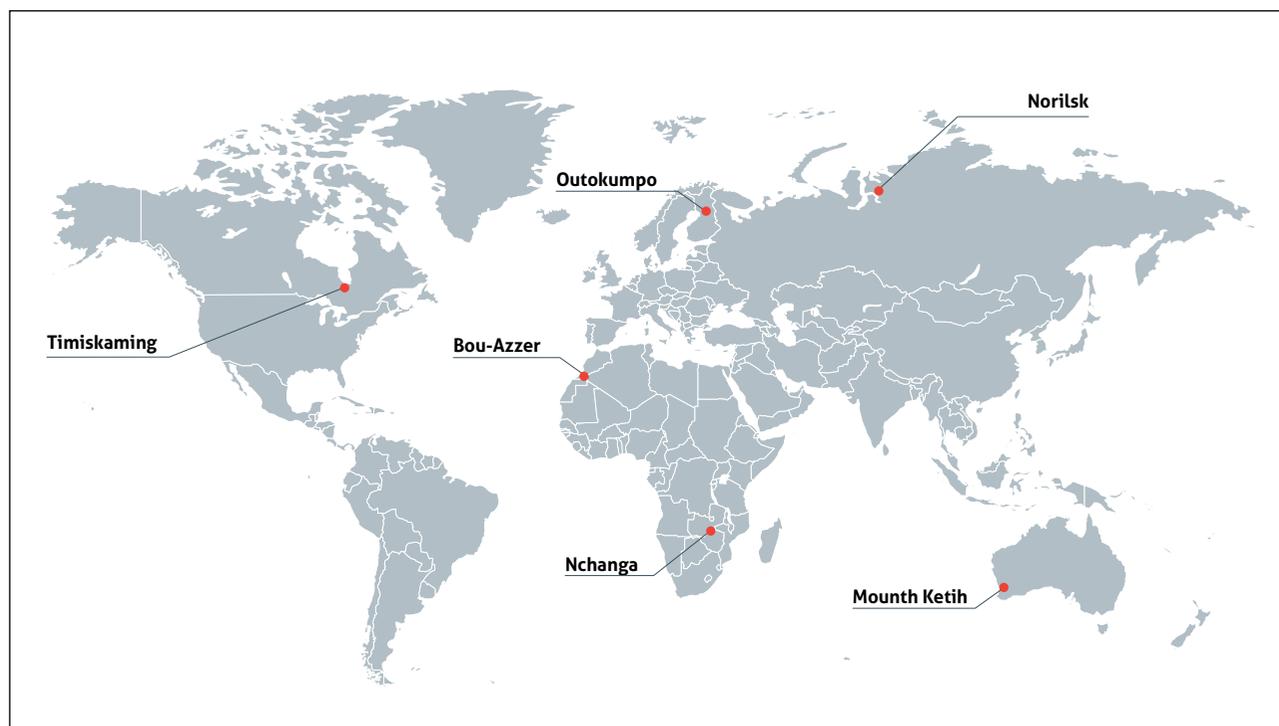
nados en este documento y su localización en el mundo se ilustran en la figura 3.

### 2.2.1. Depósitos ortomagmáticos

En los depósitos ortomagmáticos el proceso genético predominante es la diferenciación magmática en una cámara compuesta por dos fases separadas: magma rico en sulfuros (color oscuro) y magma rico en silicatos/óxidos (color claro), que al cristalizarse dan una apariencia estratiforme a los yacimientos, por lo cual se denominan cuerpos máficos y ultramáficos estratiformes. En las paragénesis<sup>5</sup> de tales depósitos los minerales más abundantes son níquel, cromo, cobre, metales preciosos y el accesorio o subordinado, así como los del cobalto, que únicamente permiten su recuperación con fines rentables como subproducto.

En estos casos los tenores de cobalto usualmente son del 0.10 %, y las estructuras geológicas predominantes donde se encuentran los minerales de mena y de cobalto son lopolitos de composición máfica. Los depósitos ortomagmáticos más representativos son los complejos de Bushveld (República de Sudáfrica), Mount Keith (Australia Occidental), Timiskaming (Canadá), Duluth (Minnesota, Estados Unidos), Norilsk (Siberia) y Pechenga (Urales). El cobalto se obtiene como subproducto en Rusia, Selibwi Phikwe (Botsuana) y Trojan (Zimbabue).

<sup>5</sup> Grupo de asociaciones de minerales relacionadas en espacio y tiempo, de carácter estable, que reflejan la composición química original del magma.



**Figura 3.** Localización de algunos yacimientos de cobalto

Fuente: modificado de Worldatlas.com (2016)

El complejo ígneo de Bushveld (CIB), localizado en Pretoria, es considerado como uno de los depósitos minerales más ricos (tiene más de un siglo de haber sido descubierto, por la presencia del platino en 1906). Además de los minerales del grupo del platino contiene, como minerales metálicos, cromita, vanadio, hierro, titanio, fluorita, níquel, cobre, cobalto, rutenio, iridio y, entre los no metálicos, materiales de construcción (*dimension stone*) y arcillas refractarias.

La litología del CIB en su fase máfica consta de peridotita ultramáfica, harzburgita, cromitita y bronzitita en su parte basal, y norita máfica, anortosita y gabro en su parte superior, a la cual sigue la fase félsica denominada Granito de Lebowa. El complejo ha sido datado por métodos radiométricos en 2054 millones de años (Ma). En Rusia los depósitos de Norilsk están asociados a un evento de flujo volcánico basáltico que en la actualidad cubre aproximadamente 2.000.000 km<sup>2</sup> en Siberia Oriental, y los de Pechenga se asocian con un desarrollo en ambiente tipo arco de islas.

### 2.2.2. Depósitos hidrotermales y de metasomatismo de contacto

En los depósitos hidrotermales y de metasomatismo de contacto ocurren concentraciones minerales metálicas, entre las cuales se pueden encontrar las de cobalto, debido

a la acción de fluidos hidrotermales de origen ígneo o metamórfico. En el ambiente ígneo el metasomatismo puede crear rocas metamórficas tipo *skarn* o rocas ígneas severamente alteradas, llamadas *greisen* o *endoskarn*. Estos depósitos metasomáticos se caracterizan por presentar una zonación mineralógica que consta de las siguientes aureolas de alteración: propilítica (causada por fluidos ricos en hierro y sulfuros), albita-epidota (fluidos ricos en silicatos de calcio y magnesio) y potásica (que produce minerales potásicos micáceos y adularia).

El yacimiento de origen hidrotermal, que contiene cobalto como mineral de mena principal, está en el complejo minero de cobalto-níquel de Bou Azzer de Ourzazate en Marruecos (Smartminerals, 2017). En este yacimiento filoniano la mineralización ocurre en venas de rocas precámbricas, en el contacto entre serpentina y una diorita rica en cuarzo. Las más importantes están relacionadas con el sistema de fallas principal: tienen un tenor promedio del 1 % de cobalto y registran una producción media anual de 100.000 t de mineral (Mohammed *et al.*, 2016). Para finales del 2013 se reportó una producción de 86.1 kt de cobalto refinado y reservas totales de 7.2 Mt (Audion *et al.*, 2014, 69). También contienen Au, Ag, As y Mo.

El yacimiento de origen hidrotermal, donde el cobalto es accesorio y se explota como subproducto, es la mina de

plata-níquel-cobalto de la población de Cobalt en el distrito de Timiskaming en el sureste de la provincia de Ontario en Canadá. Otros yacimientos hidrotermales se encuentran en Estados Unidos, en la región de Sajonia en Alemania, Finlandia, Rusia, Uganda y Myanmar (antes Birmania).

Las mineralizaciones metasomáticas de tipo *skarn* con cobalto se encuentran en el distrito minero de Outokumpu en Finlandia, en rocas de cuarzo y de calco-silicatos con serpentinita, que presentan metamorfismo de facies anfíbolita con edad radiométrica de 1960 Ma (Rubio, 2003, 86-87). La alteración produce serpentización y carbonatación de las rocas ultramáficas; los minerales de mena son sulfuros de Cu, Zn, Co, Ni, Au, con recursos totales de 50.000.000 t y tenores del 2.8 % de Cu, 1 % de Zn y 0.2 % de Co. Este depósito se clasifica como sulfuro masivo volcánico ofiolítico metamorfozado de Cu-Zn ± Co (Chipre-Omán, Outokumpu): Cu, Zn, Co, (Au, Ag, Sn, Cd). También se reportan yacimientos de esta clase, con pentlandita cobaltífera, en Namibia.

### 2.2.3. Depósitos de ambiente sedimentario

Entre los depósitos de ambiente sedimentario con minerales de mena de cobalto se encuentran los estratiformes de sulfuros volcano-sedimentarios, representados en el Cinturón Cuprífero Centroafricano, que se extiende por la República Democrática del Congo y zonas limítrofes con Zambia (Rubio Navas, 2003). En esta región y dentro de Zambia se encuentra el yacimiento de Nchanga (Chingola), donde se explotan Cu y Co. En estos yacimientos el mineral de cobalto es la linneíta. La paragénesis típica incluye, además, la calcopirita, pirrotina y piritita, con tenores entre el 0.1 % y el 0.4 % de cobalto, en rocas con edades del Precámbrico superior-Paleozoico y relacionadas con zonas tectónicas de margen continental.

Los depósitos polimetálicos submarinos formados como precipitados químicos en un ambiente sedimentario, que se originaron mediante procesos de precipitación controlados por cambios físicoquímicos, corrientes submarinas y otros factores diversos de metales disueltos en las aguas oceánicas, están representados por los nódulos de manganeso o ferromanganeso, y las costras de cobalto o costras de hierro-manganeso o costras de óxidos metálicos.

Los nódulos de manganeso se han clasificado, de acuerdo con su génesis y composición, en hidrogénicos (de precipitación de hierro y manganeso disueltos en el mar), hidrotermales (derivados de actividad volcánica submarina), halmyrolíticos (resultantes de alteración del substrato marino), diagenéticos (debidos a movilización

y reprecipitación de metales por cambios de un ambiente reductor a oxidante) (Rubio Navas, 2003, p. 89).

Reciben la calificación de “nódulos de buena calidad” los que alcanzan los contenidos de Ni entre el 1.25 % y el 1.5 %; de Cu entre el 1.0 % y el 1.4 %; de Co entre el 0.20 % y el 0.25 % y de Mn entre el 27 % y el 30 %.

Los nódulos contienen principalmente óxidos e hidróxidos hidratados de manganeso y hierro; en menor proporción, se encuentran cobalto, cobre, níquel, molibdeno, vanadio, zirconio o metales preciosos (Au), entre otros. Los recursos estimados por extrapolación ascienden a más de un trillón de toneladas de metales, de las cuales el 0.2 %, correspondería a cobalto.

En las costras de cobalto, a diferencia de los nódulos de manganeso, los tenores de cobalto son mayores del 1.0 %; se mantiene la misma proporción de Fe y Mn en el total, y aparecen otros metales en proporciones significativas: platino, titanio, cerio, níquel, fósforo, talio, telurio, wolframio, bismuto o molibdeno. Se localizan principalmente en las laderas y cimas de las montañas submarinas y a profundidades entre 800 y 2400 m, a diferencia de los nódulos, que se encuentran en llanuras profundas de piso oceánico entre 4000 y 7000 m de profundidad (Rubio Navas, 2003).

Los depósitos de sulfuros marinos exhalativos están relacionados con las chimeneas de las áreas volcánicas oceánicas activas, los bordes de placa intraoceánica o las zonas de cordillera de arco de isla interno, y los minerales de neoformación que precipitan, comprenden piritita, esferalerita y calcopirita, con elevados contenidos en zinc, plomo, cobre, cobalto, bario u otros metales. Entre ellos el oro llega a alcanzar en algunos muestreos valores medios de 24 g/t, con máximos hasta de 230 g/t. (Rubio Navas, 2003, p. 96)

Los cálculos iniciales de estos recursos parten de estimaciones entre un millón y cien millones de toneladas de metales; de llegarse a explotar esta clase tan especial de recursos se tendrían, por primera vez, recursos minerales renovables, en periodos históricos.

Otra clase de depósitos son los lateríticos (variedades “clima seco” y “tropical húmedo”), que cubren grandes extensiones y pueden alcanzar hasta un centenar de metros de espesor (Rubio Navas, 2003). En las lateritas la mayor acumulación de cobalto, hierro y níquel ocurre en la superficie y a profundidades someras; los minerales típicos son asbolana o lodo negro de cobalto, la heterogenita, la esferocobaltina y la eritrea (cobalto rojo), los cuales se forman por la alteración de las rocas máficas-ultramáficas, debido a la prevalencia del clima seco o tropical húmedo y los microorganismos del suelo durante un periodo largo. Los tenores de cobalto se encuentran en el rango del 0.05 %

al 0.15 %, que pueden ser económicamente explotables debido a los bajos costos de laboreo, a los grandes espesores y a las extensas áreas que suelen tener.

Lateritas con níquel y tenores significativos de cobalto se encuentran en Australia, Canadá, Cuba, Filipinas, Nueva Caledonia (Francia, Océano Pacífico Sur), Guatemala, Indonesia, Rusia, Madagascar, Grecia y Venezuela. En la actualidad se explotan los yacimientos localizados en Cuba y Australia occidental. En Cuba los depósitos lateríticos de Fe-Ni-Co más importantes se localizan, en su mayor parte, en el nordeste de la región oriental de la isla (Moa-Baracoa, provincia de Holguín y Pinares de Mayarí). Algunos significativos se hallan en el extremo occidental en las Lomas de Cajálbana en Pinar del Río; también aparecen recursos significativos de lateritas en la meseta de San Felipe en Camagüey y, en menor proporción, en San Miguel de los Baños en Matanzas (Iturralde-Vinent, 2007).

Una variedad de estos yacimientos lateríticos son depósitos residuales originados por la disgregación química y mecánica de las lateritas, y el posterior acarreo hasta pequeñas depresiones donde se acumulan en una matriz arcillosa. Suelen ocurrir en el Cinturón Cuprífero Centroafricano y en la isla de Nueva Caledonia (Francia), ubicada en el Océano Pacífico Sur.

### 2.3. Métodos de prospección

La prospección es la búsqueda sistemática de mineralizaciones y depósitos minerales —en este caso de cobalto— por medio de métodos geológicos, geoquímicos o geofísicos, y la exploración es el estudio de las mineralizaciones encontradas que conduzca a delimitar el cuerpo mineralizado (modelo tridimensional), la naturaleza de la mineralización y establecer la distribución geoestadística de tenores, tonelajes y valores de corte (tenor y tonelaje), con el fin de decidir si es un depósito mineral explotable económicamente. Tanto la prospección como la exploración son fundamentos del proceso científico (conocimiento) y técnico (saber hacer: lo práctico + lo tecnológico) de la investigación geológica y minera; por consiguiente, son actividades diferentes.

En el informe de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), *UN-Task Force on Reserves/Resources for Solid Fuels and Mineral Commodities* (UN, 1997, 2001), se describen en profundidad las etapas de reconocimiento (*Reconnaissance*), previa a la de prospección (*Prospecting*), exploración general (*General Exploration*) y de exploración detallada (*Detailed Exploration*), posteriores a la prospección, que generan un marco estándar (*framework*) para

todos los países en el desarrollo de un estudio geológico, con fines de obtener la clasificación de reservas/recursos de un depósito mineral.

La prospección del cobalto se engloba entre las utilizadas en la búsqueda de depósitos minerales de metales de gran interés industrial, como cobre, níquel o hierro, dado el carácter accesorio o subordinado que tiene en estos depósitos. A raíz de que han sido descubiertos en su mayor parte los existentes en superficie, se requiere emprender su búsqueda en el subsuelo, partiendo de un conocimiento geológico regional, donde los métodos de prospección se aplican en estudios que generalmente comprenden tres fases.

La primera fase se inicia con el establecimiento de las hipótesis geológicas (o modelos) para el hallazgo de nuevos depósitos minerales (Murillo, 1987). En el caso del cobalto, se relaciona con el grado de prospectividad o de existencia potencial de ambientes geológicos favorables en el área de estudio, sea local, regional o nacional.

La *prospección* se establece con base en el análisis de informes; mapas geológicos, geoquímicos, geofísicos y mineros; inventarios mineros, e interpretación de datos de sensores remotos satelitales y de fotos aéreas, así como de búsquedas exhaustivas (*data mining*) en bases de datos georreferenciadas (sistemas de información geográfica) y alfanuméricas de temática geológica, geoquímica, geofísica, ambiental y minera, según criterios geológicos (litologías, edades, estructuras, minerales de mena y de ganga, paragénesis, zonación, paleogeográficos, geotectónicos, entre otros), geofísicos (contrastes), geoquímicos (anomalías), ambientales (vegetación, fauna, aguas, suelos, aire, clima) y mineros (existencia de manifestaciones, mineralizaciones, prospectos, minas activas o inactivas, morfología, dimensiones, tonelajes, tenores, etc.).

De ese completo análisis se obtiene un área o un conjunto de áreas que posiblemente cumplen el modelo establecido. En estas se pueden realizar visitas de campo con el fin de desarrollar estudios geológicos preliminares, entre otros, que corresponden a la fase de *reconocimiento* (*Reconnaissance*), según el marco estándar (*framework*) de Naciones Unidas.

En el caso del cobalto, las áreas potenciales están relacionadas, en el medio continental, con los ambientes ortomagmáticos de rocas máficas y ultramáficas —con presencia de sulfuros masivos—, con los estratiformes volcánico-sedimentarios, los de alteración hidrotermal y metasomatitas, y las lateritas, acompañadas o no de placeres minerales. En el medio marino están relacionadas con los nódulos de manganeso, las costras de cobalto y los sulfuros metalíferos.

La segunda fase o prospección *sensu stricto* inicia una vez ha sido identificada el área potencial, o áreas *target*, y establecido el ambiente geológico; durante esta fase se aplican los métodos de prospección terrestre, marino o aéreo.

El método terrestre incluye trabajos de campo, en los que se utilizan la cartografía geológica, la geoquímica y la geofísica. En la cartografía geológica los levantamientos producen datos e información que se registra en informes, mapas geológicos, cortes, columnas, resultados de laboratorio geológico, con sólidas observaciones sobre litología; zonas de alteración; presencia de minerales indicadores (*pathfinders*); tectónica; estructuras y microestructuras; estratigrafía y cronoestratigrafía; petrografía (luz polarizada, reflejada); microscopía electrónica, entre otros factores.

Grandes masas de sulfuros masivos, y por consiguiente de cobalto, se pueden identificar con el procesamiento digital de datos de sensores remotos. También pueden detectarse las zonas de alteración y de *gossan* que suelen acompañar estos yacimientos, que se delimitan luego con levantamientos geológicos convencionales. Estos depósitos prácticamente han sido descubiertos a la fecha.

La geoquímica (composición química y mediciones de los contenidos de uno o más elementos presentes en las muestras), como método de prospección, involucra la toma de muestras de rocas en afloramiento y de cantos rodados conspicuos, sedimentos activos, agua, gases, vegetación, concentrados en batea y suelos para análisis preliminares de campo y analíticos en el laboratorio (rayos X, espectrometría por absorción atómica o de masa, plasma inductivo acoplado [*inductively coupled plasma*] o ICP, por sus siglas en inglés), ensayo químico o al fuego. El tratamiento de sus datos permite establecer los valores normales y los umbrales (*thresholds*), e identificar anomalías.

La geoquímica aplicada a la detección de variaciones en la composición de los materiales (rocas, suelos, sedimentos activos, entre otros), relacionados con la posible presencia de o proximidad a un depósito de sulfuros masivos, que es una de las fuentes principales de cobalto, es la herramienta adecuada para su prospección. Esta se inicia, usualmente, con los estudios de orientación geoquímica, realizados con la finalidad de establecer los valores umbrales para la clasificación de los datos geoquímicos (anómalos, si superan estos valores) y evaluar el significado económico de los elementos de interés industrial presentes en ellos, como Cu, Ni, Fe, que están acompañados de otros elementos enriquecidos como el cobalto (motivo de este artículo), junto con As, B, Au, Ag, Ba y Mn, en contraste con Ca y Na, que presentan contenidos bajos en sedimentos activos (Höy, 1995). De igual manera, estos depósitos se

asocian a valores anómalos de Ag y altos contenidos de Ni, Bi, Co, As, U, Fe en muestras de roca (Lefebure, 1996). En lateritas níquelíferas y depósitos residuales, la técnica del concentrado en batea para la obtención de la muestra es la más utilizada en prospección.

En la prospección minera la geofísica (mide propiedades físicas de los cuerpos de roca y mineralizaciones del subsuelo) utiliza métodos magnéticos, radiométricos y electromagnéticos en perfiles y sondeos, empleando magnetómetros, centíímetros, equipos de polarización espontánea o inducida, con los cuales se detectan metales no ferrosos (Au, Ag, Al), metales ferrosos, minerales magnéticos y minerales conductores de electricidad. En menor proporción, se utilizan los métodos sísmicos en la prospección, debido al tamaño relativamente pequeño y a la geología complicada que poseen los depósitos minerales, en general, y al elevado costo de los trabajos con estos métodos.

Dado que el cobalto se encuentra como mineral secundario en depósitos de sulfuros, estos minerales interconectados producen zonas conductivas eléctricas que pueden localizarse con los métodos de polarización inducida, electromagnéticos y magnetotélúricos. En algunos casos es útil la magnetometría, dada la presencia de abundante magnetita; en otros, la gravimetría, porque los cuerpos máficos y ultramáficos se asocian a excesos de masa, que producen buen contraste con las zonas no mineralizadas, finalmente, los cuerpos masivos extensos pueden localizarse con sísmica de refracción.

En el medio marino la búsqueda de los depósitos polimetálicos submarinos implica el empleo de la teledetección, porque no existe contacto entre el observador y el objeto de estudio, para lo cual se emplean las técnicas geofísicas radiométricas de detección de rayos gamma, la sísmica y el sonar (Rubio Navas, 2003). Por otra parte, en el medio aéreo la prospección se ejecuta con técnicas geofísicas como gravimetría (densidades), magnetometría, radiometría, electromagnetismo (conductividad) y sensores remotos.

Las perforaciones, los apiques y las trincheras suelen considerarse métodos de exploración minera o fases de exploración general y de exploración (UN, 2001), y se llevan a cabo en áreas donde se han obtenido resultados satisfactorios en las fases de prospección descritas, acompañadas de una densificación de la malla del muestreo geológico, geoquímico y geofísico, y de estudios económicos, financieros, ambientales, legales e investigación de mercados. Según el marco estándar o *framework* de la ONU (UN, 1997), el grado de precisión del estudio de *exploración*

*general* debería ser suficiente para decidir si un estudio de prefactibilidad (*Prefeasibility Study*) y de exploración detallada están garantizados para desarrollarlos en el área de estudio. El estudio de *exploración detallada* debe proveer la información, en cantidad y calidad suficiente, para sustentar la toma de decisión sobre llevar o no a cabo un *estudio de factibilidad* (*Feasibility Study*).

#### 2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

Los sistemas de explotación del cobalto están directamente relacionados con los utilizados en la explotación de los yacimientos de cobre, níquel y hierro, de donde se obtiene como subproducto o coproducto<sup>6</sup>, de acuerdo con su localización (continental o marino). En el ámbito continental, en los depósitos lateríticos, se utiliza el método de cielo abierto, porque se encuentra en la superficie o cerca de ella un gran volumen de material relativamente homogéneo, al cual se le trata por hidrolixiviación para la obtención de cobalto y de sus elementos asociados.

En los yacimientos estratiformes y de metamorfismo de contacto se utilizan los desarrollos mineros subterráneos, mediante la construcción de túneles, en especial cuando son profundas las zonas mineralizadas, a través de los métodos, entre otros, de *block caving* (los bloques de roca mineralizada caen por gravedad a través de tolvas y luego son transportados hasta el molino) y *cut and fill* (corte y relleno: se excava la roca capa por capa hacia arriba en espesores entre 0.90 y 2.80 m y se hace explotar controladamente para luego transportar estos materiales hasta el molino).

También se emplean los sistemas mixtos, subterráneos y de cielo abierto, debido a que este último se utiliza para remover y aprovechar las capas de moderado espesor de lateritas, junto con sus minerales de mena o de suelo no mineralizado con su vegetación. En los yacimientos ortomagmáticos el método de explotación es a cielo abierto en niveles de 3 a 6 m con paredes de ángulo variable; se emplea cuando los minerales de mena se encuentran cerca de la superficie.

En el ámbito marino, en la explotación de los depósitos polimetálicos submarinos, se han considerado los sistemas de dragado por arrastre y por aspiración, los cuales se evalúan a la luz de su impacto ambiental en el fondo oceánico, el agua y la fauna marina.

En la extracción de cobalto el procesamiento de los minerales está relacionado con el metal al cual se asocia y, en términos generales, se basa en los siguientes principios (Wang, 2006):

- Incluir el beneficio de los minerales de cobalto dentro de los de producción de Cu y Ni, acorde con los depósitos de sulfuros donde se encuentra.
- Concentrar los materiales cobaltíferos a través de las operaciones hidrometalúrgicas y pirometalúrgicas del Cu y Ni (concentrado cobaltífero).
- Afinar el electrolito/solución de cobalto mediante el empleo de las técnicas de separación y refinación, como precipitación selectiva, extracción de solventes e intercambio iónico.
- Producir el cobalto en sus variedades comerciales: metal, polvo o químicos, mediante procesos independientes seleccionados, tipo electrorrefinado<sup>7</sup> (*electrowinning*) o electroextracción y precipitación por reducción (por ejemplo, reducción acuosa de óxido cobáltico-cobalto en un medio amoniacal usando sulfato de amonio como agente de reducción a presión atmosférica, o con ácido sulfúrico a alta presión).

En el beneficio de los depósitos de cobre y níquel con cobalto los sulfuros son tratados inicialmente hasta obtener el concentrado metálico que luego se refina mediante un proceso de tostación-lixivación-purificación-electroextracción. El concentrado se tuesta y luego se lixivia con ácido sulfúrico; de esta solución se precipita el cobalto como hidróxido de cobalto, una vez que se han extraído los metales acompañantes. Este hidróxido se redisuelve en ácido y el cobalto se recupera por electrólisis (electroextracción).

En el tratamiento de depósitos de sulfoarseniuros de cobalto el procesamiento se inicia con una etapa de separación magnética para retirar los óxidos, continúa con la tostación y luego con fusión en alto horno, que proporciona el *matte* que contiene cobalto y níquel —principalmente—, y hierro, que se remueve por tostación y lixivación en presencia de cal y clorato sódico (Rubio Navas, 2003). El cobalto se extrae finalmente con un tratamiento químico.

En las lateritas se inicia el tratamiento con una etapa de preconcentración, que comprende molienda, separación de lo mineralizado, trituración y secado. Siguen los

<sup>6</sup> Se entiende por coproducto dos o más productos obtenidos de la misma unidad del proceso.

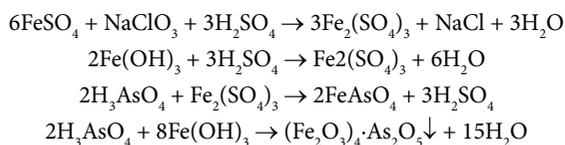
<sup>7</sup> Electroextracción es la electrodeposición de metales a partir de sus minerales de mena en estado de solución o sometido a licuefacción (paso del estado sólido a líquido). Electrorrefinado es electroplateado o galvanoplastia a escala industrial.

procesos de pirometalurgia (fundición), reducción por tostación, hidrometalurgia (lixiviación) o biolixiviación, y refinación. En el procesamiento de los nódulos polimetálicos submarinos se aplican las técnicas descritas de hidrometalurgia y pirometalurgia.

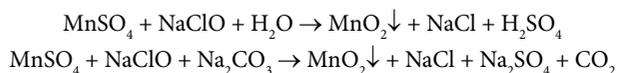
Obtenido el concentrado cobaltífero la purificación consta de las fases de separación y refinación. La separación se hace mediante fundición con procesos de pirometalurgia acompañada de sustancias químicas en los que el *matte*, que contiene cobalto, se deposita en el fondo y se conduce a la refinadora, donde la escoria silicatada (*slag*) asciende hacia el techo del horno de fusión, para recibir un tratamiento especial para la extracción de los metales principales (Cu, Ni). En los casos de menas con bajo tenor de cobalto, su concentración mejora con el empleo de técnicas de hidrometalurgia (utilización de tratamientos químicos a bajas temperaturas) y biolixiviación<sup>8</sup> (Rubio Navas, 2003). En esta etapa se alcanzan purezas entre el 75 y el 85 % del metal principal, y del 65 al 75 % en cobalto (electrolito/solución).

La afinación del electrolito/solución, hasta obtener un grado de pureza del cátodo del 99.98 % de cobalto, tiene dos etapas: purificación de la solución y electrorrefinado, que se describen a continuación (Wang, 2006). La purificación de la solución requiere los procesos de precipitación química, extracción del solvente e intercambio iónico.

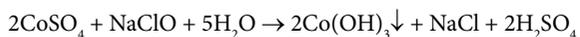
- Por medio de la precipitación química (técnicas de neutralización de oxidación y electrólisis) se remueven el hierro y el arsénico, según las siguientes reacciones:



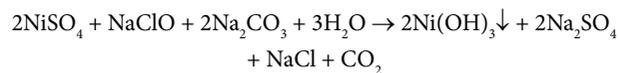
Luego se procede a remover el manganeso, mediante el empleo de la técnica de la hidrólisis oxidativa, de acuerdo con las siguientes reacciones:



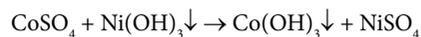
Posteriormente, el níquel:



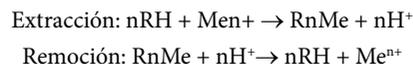
<sup>8</sup> Es un proceso hidrometalúrgico que utiliza microorganismos para liberar los metales en solución, para luego continuar su tratamiento con electrólisis u otros métodos.



Con un exceso de  $\text{Co}^{+2}$ , se produce la siguiente reacción:



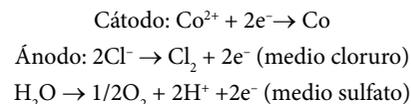
En la etapa de la extracción del solvente se usa  $\text{P}_5\text{O}_7$  (similar al PC-88 y SME-418), y Cyanex 272 para separar cobalto y níquel de los medios con sulfato y cloruro:



- Con el proceso de intercambio iónico, el Lewatit<sup>®</sup> TP 207 (resina macroporosa de intercambio catiónico) puede remover cobre y zinc de la solución de níquel y cobalto, que a su vez puede separar níquel de cobalto, o viceversa. El Lewatit<sup>®</sup> Monoplus TP 207 se utiliza para separar magnesio y calcio de la solución de níquel y cobalto, y el SuperLig<sup>®</sup> 241 se usa para extraer níquel de la solución de cobalto. También se emplea SuperLig<sup>®</sup> 241 para la remoción combinada de cobre y  $\text{Fe}^3$ , junto con níquel, del electrolito electroextractado de cobalto.

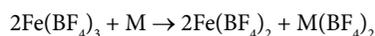
En la recuperación de cobalto en un proceso con sulfuros de cobre, este elemento es removido vía electroextracción; el Fe, junto con el Zn, precipita aumentando el pH de la solución.

En el electrorrefinado el cobalto se obtiene por electroextracción a partir del electrolito de cobalto en medio cloruro o sulfato, utilizando ánodos insolubles:



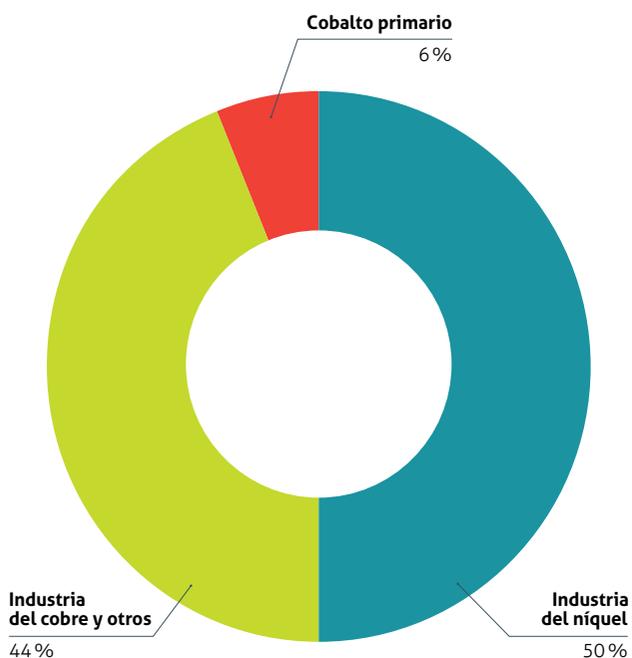
Durante el electrorrefinado el Co es disuelto electroquímicamente del ánodo (> 95 % Co, < 0.45 % Ni, < 0.05 % Cu, y < 1 % Zn) en un electrolito, produciendo cationes de  $\text{Co}^{2+}$  y electrones.

En el tratamiento de los lodos que resultan de los procesos anteriores, la tecnología del fluoborato se reconoce como un lixiviador efectivo en condiciones de temperatura ambiente o elevada, donde la reacción de oxidación solubiliza los metales base en el sistema fluoborato:



### 2.5. Recursos, reservas y comercio

El cobalto, a pesar de ocupar el puesto 33 por su abundancia en la corteza terrestre, es un metal ampliamente diseminado el cual, como se ha mencionado en el documento, se obtiene mayoritariamente como subproducto o coproducto de la extracción de otros metales, especialmente níquel y cobre. Anterior a la década de los años 90, la oferta de cobalto estaba ligada principalmente al continente africano, en los países de la República Democrática del Congo y Zambia; sin embargo, en los últimos años han ocurrido cambios en el escenario de oferta de cobalto, entrando a desempeñar un papel importante como productores países como Australia, Brasil, Rusia, China, Canadá, Cuba y Madagascar. Con el desarrollo de tecnologías innovadoras de extracción existe en la actualidad una gran posibilidad de obtener el cobalto como metal primario. En la figura 4 se ilustra una distribución aproximada de los flujos de producción de cobalto actuales.



**Figura 4.** Distribución de la producción de cobalto (%)

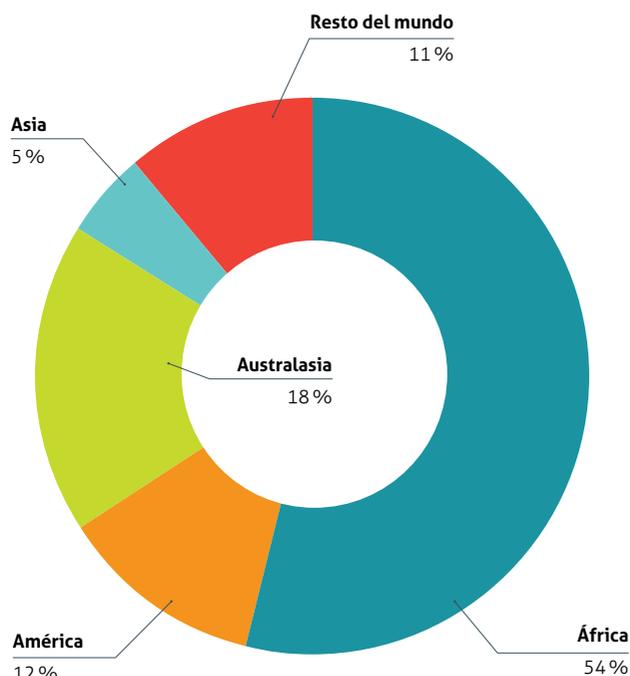
Fuente: Cobalt Development Institute (2017)

Como el cobalto es un mineral estratégico y crítico, las estadísticas sobre recursos, reservas y comercio (producción, consumo, precios) son importantes, dada la depen-

dencia que los países industrializados tienen de este metal, en especial Estados Unidos, China y Japón.

Los datos de reservas y producción minera se han tomado de los anuarios publicados en línea en los portales del United States Geological Survey (USGS) y del Cobalt Development Institute, los cuales reportan información histórica consolidada hasta el 2014 y estimada para el 2015.

Las reservas globales de cobalto, según el USGS (2016), son del orden de 7.100.000 t (cifra estimada para el 2015) y su distribución en las regiones mundiales se ilustra en la figura 5.



**Figura 5.** Distribución de las reservas mundiales de cobalto, 2015

Fuente: USGS (2016)

La información sobre reservas es dinámica; en la tabla 5 y la figura 6 se ilustra la evolución de las reservas de cobalto en el periodo de análisis, 1995-2015(e), reportada para los principales países.

La cifra de reservas aumentó considerablemente entre 1995 y el 2005, pasando de 4.000.000 a 7.000.000 t, lo cual representó un incremento del 75 %. En los últimos años estos valores se han mantenido en orden de magnitud, con pequeñas variaciones, reportándose una cifra de 7.1 millones de toneladas estimadas para el 2015 (USGS, 2016).

**Tabla 5.** Evolución de las reservas de cobalto por país

País	Reservas (toneladas)				
	1995	2000	2005	2010	2015e
Estados Unidos				33.000	23.000
Australia	23.000	880.000	1.300.000	1.400.000	1.100.000
Brasil			35.000	89.000	78.000
Canadá	45.000	45.000	130.000	150.000	240.000
China				80.000	80.000
Congo	2.000.000	2.000.000	3.400.000	3.400.000	3.400.000
Cuba	1.000.000	1.000.000	1.000.000	500.000	500.000
Madagascar					130.000
Nueva Caledonia	230.000	230.000	230.000	370.000	200.000
Filipinas					250.000
Rusia	140.000	140.000	250.000	250.000	250.000
Sudáfrica					31.000
Zambia	360.000	360.000	270.000	270.000	270.000
Otros <sup>1</sup>	90.000	90.000	220.000	760.000	610.000
Total	3.888.000	4.745.000	6.835.000	7.302.000	7.162.000
Ajustado USGS	4.000.000	4.700.000	7.000.000	7.300.000	7.100.000

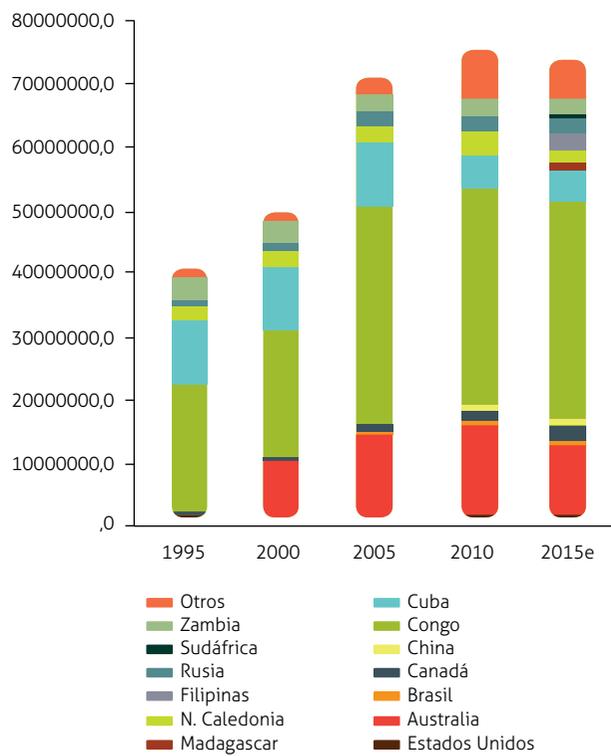
<sup>1</sup> Se incluyen Costa de Marfil, Mauritania, Tanzania, Uganda, en África; México, Colombia, en América, e Indonesia, Papúa Nueva Guinea, en el Sudeste Asiático; <sup>e</sup> estimado.

Fuente: USGS (2016)

Entre los países mineros de cobalto tradicionales, con reservas de cobalto que hacen posible el aumento y el mantenimiento de estas, entre 1995 y el 2015, pueden mencionarse Australia, que las incrementó aproximadamente 50 veces; Canadá, 5 veces; y República Democrática del Congo y Rusia, 1.7 veces.

En el 2005 Brasil, con 35.000 t y en el 2010 China, con 80.000 t, emergieron como países mineros de cobalto. Es notable el caso de Canadá, que ha continuado el incremento de sus reservas hasta alcanzar el valor estimado de 240.000 t en el 2015, lo cual ha contrarrestado con el descenso de las reservas en otros países. Tan solo dos países, Congo y Australia, representan el 63 % de las reservas reportadas en el 2015.

La siguiente relación de países (tabla 6) ilustra esquemáticamente dónde, en la actualidad, existe producción minera o refinación de cobalto.



**Figura 6.** Evolución de las reservas de cobalto por país (toneladas)

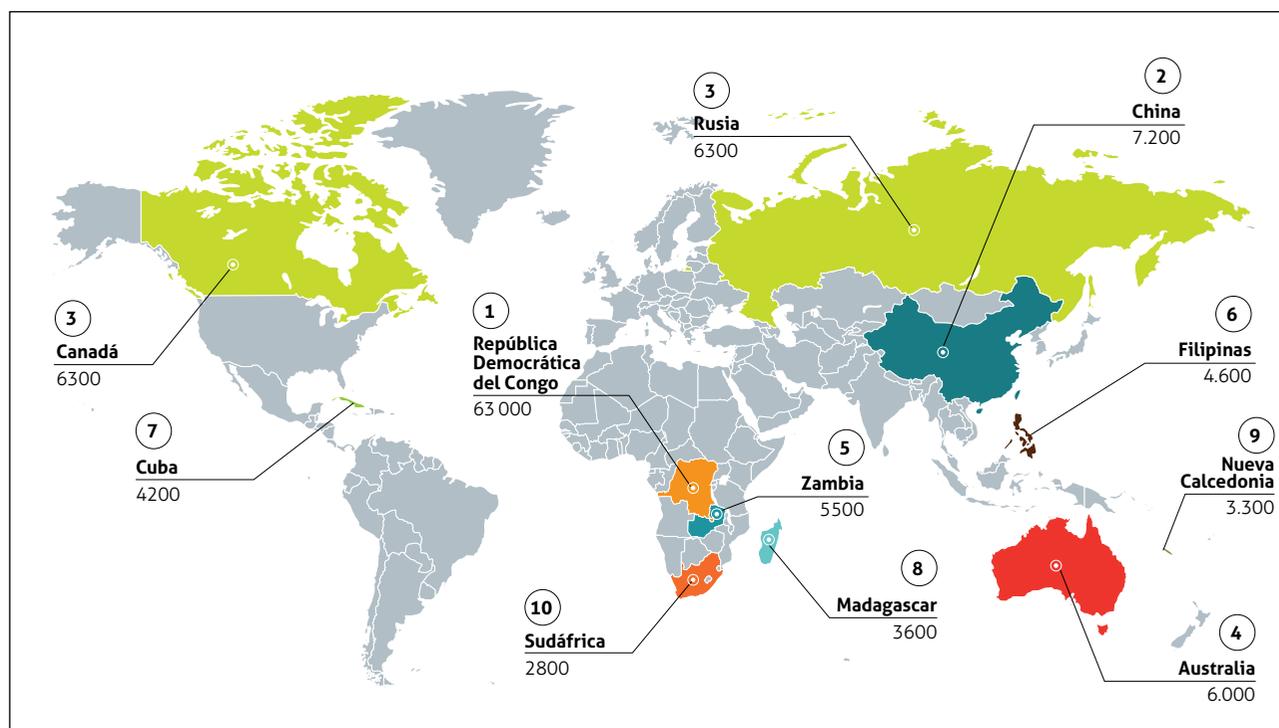
Fuente: USGS (2016)

**Tabla 6.** Países con minería o refinación de cobalto

País	Min.	Ref.	País	Min.	Ref.
Australia	✓	✓	Japón		✓
Bélgica		✓	Madagascar	✓	✓
Botsuana	✓		Marruecos	✓	✓
Brasil	✓	✓	Nueva Caledonia	✓	
Canadá	✓	✓	Noruega		✓
China	✓	✓	Rusia	✓	✓
Cuba	✓		Sudáfrica	✓	✓
Finlandia			Congo	✓	✓
Francia			Uganda		✓
			Zambia	✓	✓

Fuente: Cobalt Development Institute (2017)

Los volúmenes de cobalto producidos en el 2015 (valores estimados), están representados en la figura 7 donde se observa que, en la actualidad, los mayores productores mineros de cobalto son la República Democrática del Congo, China, Australia, Canadá y Rusia. Al relacionar algunos de estos países tradicionales en la minería de cobalto con el tipo de depósito que explotan, se sabe que Australia lo extrae de las lateritas, donde la proporción níquel-cobalto es 10:1; Canadá, de los depósitos ortomagmáticos ultramáficos y máficos; República Democrática del Congo, en los depósitos estratiformes representados en el Cinturón Cuprífero Centroafricano, y Rusia de las lavas basálticas ubicadas en Siberia oriental (*Siberian Traps igneous province*), que representan los depósitos con tonelaje más alto en minerales de la asociación sulfuros Ni-(Cu-Co).



**Figura 7.** Producción minera de cobalto por países, estimada para el 2015 (toneladas)

Fuente: USGS (2016)

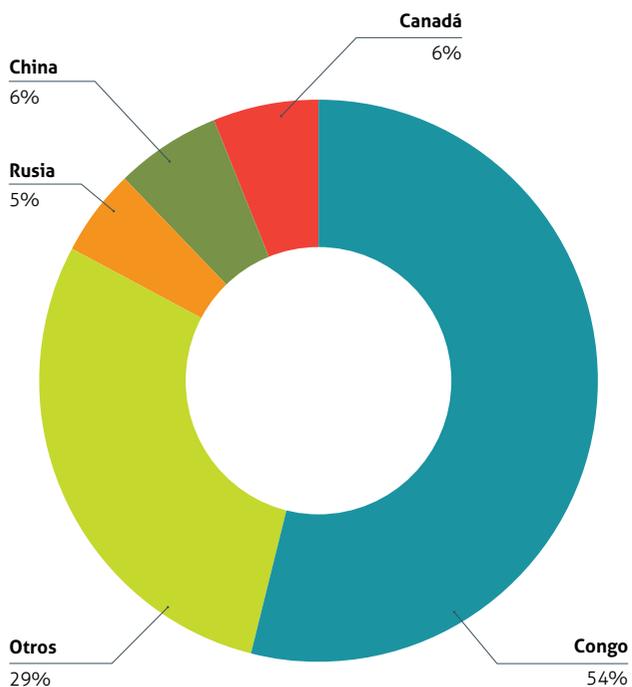
Las cifras que muestran la evolución de la producción minera mundial de cobalto, en el periodo 1995-2015, se ilustran en la tabla 7 y de manera esquemática, por país, en la figura 8. La producción mundial ha venido creciendo desde 1995, cuando solo alcanzaba las 22.100 t, hasta lle-

gar, en la actualidad, a 124.000 (cifra estimada), lo cual significa que en los últimos 20 años la producción se ha quintuplicado. Un solo país, República Democrática del Congo, responde por el 51 % de la producción mundial.

**Tabla 7.** Producción minera de cobalto por país

País	Producción minera (toneladas)				
	1995	2000	2005	2010	2015e
Estados Unidos					700
Australia	2500	5600	6000	3850	6000
Brasil			1200	1600	2600
Canadá	5270	5300	5500	4600	6300
China			1300	6500	7200
Congo	1650	7000	22.000	47.400	63.000
Cuba	1560	2400	3600	3600	4200
Madagascar					3600
Nueva Caledonia	800	1100	1200	1000	3300
Filipinas					4600
Rusia	3500	3600	5000	6200	6300
Sudáfrica					2800
Zambia	5000	4600	9300	5700	5500
Otros	1810	3700	2800	9000	7700
Total	22.090	33.300	57.900	89.450	123.800
Ajustado USGS	22.100	33.300	57.900	89.500	124.000

Fuente: USGS (2016)



**Figura 8.** Producción minera de cobalto por país (toneladas)

Fuente: USGS (2016)

Es evidente el liderazgo que ha ganado la República Democrática del Congo desde hace 15 años, pues cuando los demás países productores no superan, en ningún caso, las 10.000 t anuales, este país sobrepasa, en la actualidad, las 60.000 t por año.

### 2.6. Perspectivas

Las perspectivas sobre las fuentes de minerales de cobalto se centran actualmente, como también lo señaló Álvarez (1987), en los depósitos submarinos de nódulos de manganeso, costras de cobalto y exhalativos. Más recientemente, en el procesamiento de chatarras, escombreras y en el reciclaje, dado que el metal es “usado pero no consumido” en muchos procesos y aplicaciones, y podría, teóricamente, reciclarse infinitamente, lo cual es particularmente cierto en aplicaciones metalúrgicas.

Los depósitos submarinos de moderada profundidad, con tonelajes superiores a mil millones de toneladas y tenores significativos de metales vitales, estratégicos y críticos para la humanidad, serán los yacimientos a explotar sosteniblemente en el futuro, durante al menos tres siglos, tiempo que se estima duraría su explotación antes de agotarse sus reservas. La energía para los sistemas de explotación provendría de la energía atómica, para los métodos de procesamiento de los minerales en las plantas metalúrgicas de la fusión nuclear. Acerca de la organización del trabajo operativo en el fondo oceánico, este se haría con robots teledirigidos.

Las perspectivas en materia de precio no son fácilmente predecibles, pues son muchos los factores que inciden en la definición del precio, entre los cuales se pueden mencionar: nivel de escasez, balance oferta-demanda, inventarios

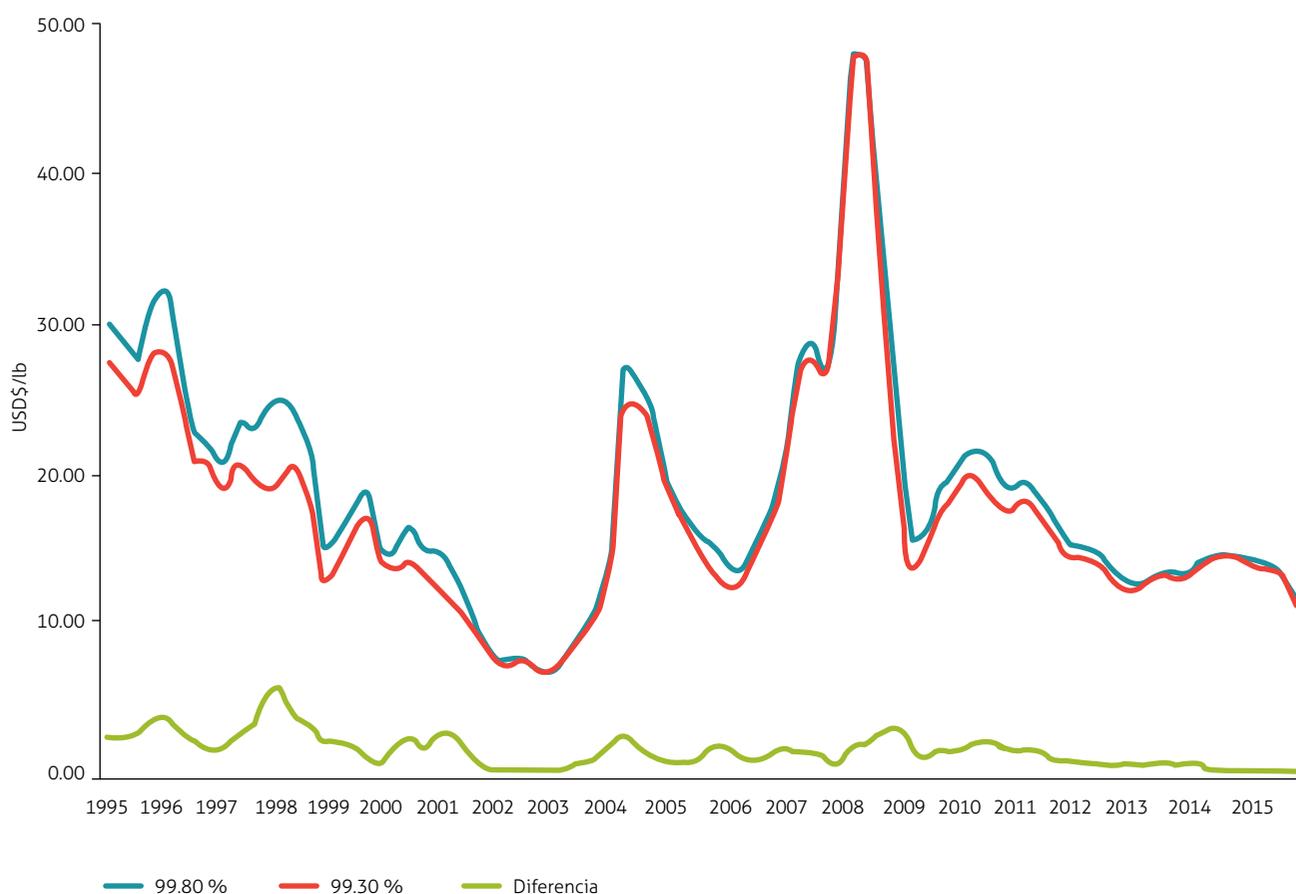
y tasa de uso, desempeño del mercado, expectativas y nivel de inversión. Otros factores que inciden están relacionados con la globalización, las políticas de comercio de los países, la geopolítica y las tendencias de crecimiento nacionales.

Los precios del cobalto (figura 9) entre 1995 y el 2015 presentaron, en general, un comportamiento a la baja, con dos incrementos que alcanzaron máximos cercanos a los 30 y 50 USD \$/lb entre los años 2004-2005 y 2008-2009, respectivamente. Se observa también el comportamiento entre 1995 y el 2003, cuando el precio promedio anual *spot* del cátodo de cobalto 99.8 % cayó desde USD \$30 a USD \$7/lb, aproximadamente (disminución del 76 %) convirtiéndose, este último, en el menor precio alcanzado en el periodo.

Las expectativas sobre la producción y el consumo, a corto y mediano plazo, se estiman cubiertas con las minas que actualmente se explotan en el mundo, al menos en los

próximos cien años, lo que hace innecesarias las explotaciones de los depósitos submarinos. La tendencia del consumo es al alza, debido a las crecientes demandas de la industria aeroespacial, de los fabricantes de turbinas, de baterías recargables y de los laboratorios productores de catalizadores.

Las perspectivas en el mercado internacional para el cobalto seguirán siendo de primer orden, pues todavía es un mineral estratégico. La demanda global ha mantenido un crecimiento sostenido en los últimos 15 años, si se tiene en cuenta que para 1998 era de 33.000 t, cifra que alcanzó en el 2005 las 55.000 t; en la actualidad la información publicada sugiere que la demanda mundial de cobalto en el 2015 fue de 87.000 t, lo que representó un incremento del 7.5 % en relación con el año anterior (Cobalt Development Institute, 2017).



**Figura 9.** Precio *spot* del cátodo de cobalto 99.8 % y 99.3 % (USD \$/lb)

Fuente: Cobalt Development Institute (2017)

### 3. Cobalto en Colombia

Actualmente en Colombia no hay reportes oficiales de producción de cobalto. A continuación se relacionan los aspectos más importantes de este mineral en el territorio nacional.

#### 3.1. Geología regional

Los minerales de cobalto en mena principal son desconocidos en depósitos de Colombia. Las referencias sobre depósitos minerales con cobalto subordinado se clasifican en el grupo de los ortomagmáticos, tipo sulfuros masivos, en la región costa Pacífica norte (Chocó biogeográfico), ubicada en el ambiente geotectónico de la Cordillera Occidental; en las lateritas níquelíferas al norte de Colombia (departamento de Córdoba) y en “algunas minas del Distrito Minero de California y Vetas en Santander” (Álvarez, 1987), al norte de la Cordillera Oriental.

Lo destacable actualmente, en relación con el cobalto, son las lateritas níquelíferas de origen secundario, producto de alteración de rocas ultrabásicas de edad Cretácica, localizadas en Cerromatoso, municipio de Montelíbano, departamento de Córdoba. El marco geológico regional de estos depósitos y de los sulfuros masivos del Chocó se encuadran en la Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental (PLOCO), mientras que las minas de origen hidrotermal del distrito de Vetas y California, en Santander, se incluyen en la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana (PLCMG), ambas descritas en el *Mapa geológico de Colombia* (Gómez *et al.*, 2006).

Según Gómez *et al.* (2006) la PLOCO “consiste en complejos de rocas ultramáficas, gabros asociados a tonalitas, basaltos asociados a dacitas y riolitas, komatiitas, picritas y rocas sedimentarias de origen marino” (p. 2). A su vez, Nivia (2001), al referirse al fallamiento de la PLOCO, expresa que esta exhibe una “estructura cortical determinada esencialmente por la interacción de un sistema complejo de fallas regionales en las que predominan tres direcciones de fallamiento: N 20-30 E, N 60-70 E y N 40-50 W” (p. 103). A estos fallamientos, al considerarse sistemas, Lozano (1986) los denomina Palestina, Salento y Cucuana, respectivamente.

En cuanto a la edad geológica, se deben tener en cuenta dos aspectos: la edad del conjunto litológico que forma la PLOCO y la edad de acreción de la PLOCO a la margen occidental de Colombia en ese tiempo. No existen edades definitivas al respecto, pero sí acuerdos científicos en torno a lo siguiente:

- La edad de los cuerpos ultramáficos y máficos, sopor-tada en el método K/Ar separados de hornblenda, es  $84 \pm 2$  Ma y  $83 \pm 2$  Ma, según Brook (1984).
- La edad de las rocas hipoabisales y volcánicas básicas, por asociación geoespacial con la isla de Gorgona y con base en cuatro dataciones por el método  $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ , está en el rango comprendido entre  $86 \pm 4.6$  Ma y  $88 \pm 2.1$  Ma, y promedio 87.4 Ma (Nivia, 2001).
- La edad del Complejo Estructural Dagua, con base en fósiles, manifiesta que “se formaron probablemente en el intervalo estratigráfico Albiano-Maestrichtiano y con mayor seguridad entre el Turoniano y el Maestrichtiano” (Nivia, 2001, p. 74).
- La edad de acreción se fija en el Eoceno (Gómez *et al.*, 2006).

La PLCMG es un zócalo cristalino que consta de esquistos, neises, anfibolitas y granulitas. Está limitado al oeste por la Falla de San Jerónimo y al este por la Provincia Litosférica Continental Paleoproterozoica Amazónica (PLCPA), y se extiende desde los límites de Colombia con Ecuador en el sur, hasta la Alta Guajira, al norte, donde limita con bloques que forman parte de la Provincia Litosférica Oceánica Cretácica de la Guajira (PLOGC) o con el mar Caribe (Gómez *et al.*, 2006). En la PLCMG se alojan granitoides jurásicos, afloran rocas vulcano-sedimentarias a manera de cobertura jura-cretácica sobre el zócalo cristalino y sedimentitas depositadas en una cuenca intra-continental que evolucionó durante el Jurásico y el Cretácico. Esta cuenca fue lentamente invadida por el mar en el Cretácico temprano y la sedimentación estuvo controlada por la actividad de fallas normales por lo menos hasta el Albiano inferior y por variaciones en el nivel eustático entre el Albiano medio y el Maestrichtiano (Gómez *et al.*, 2006).

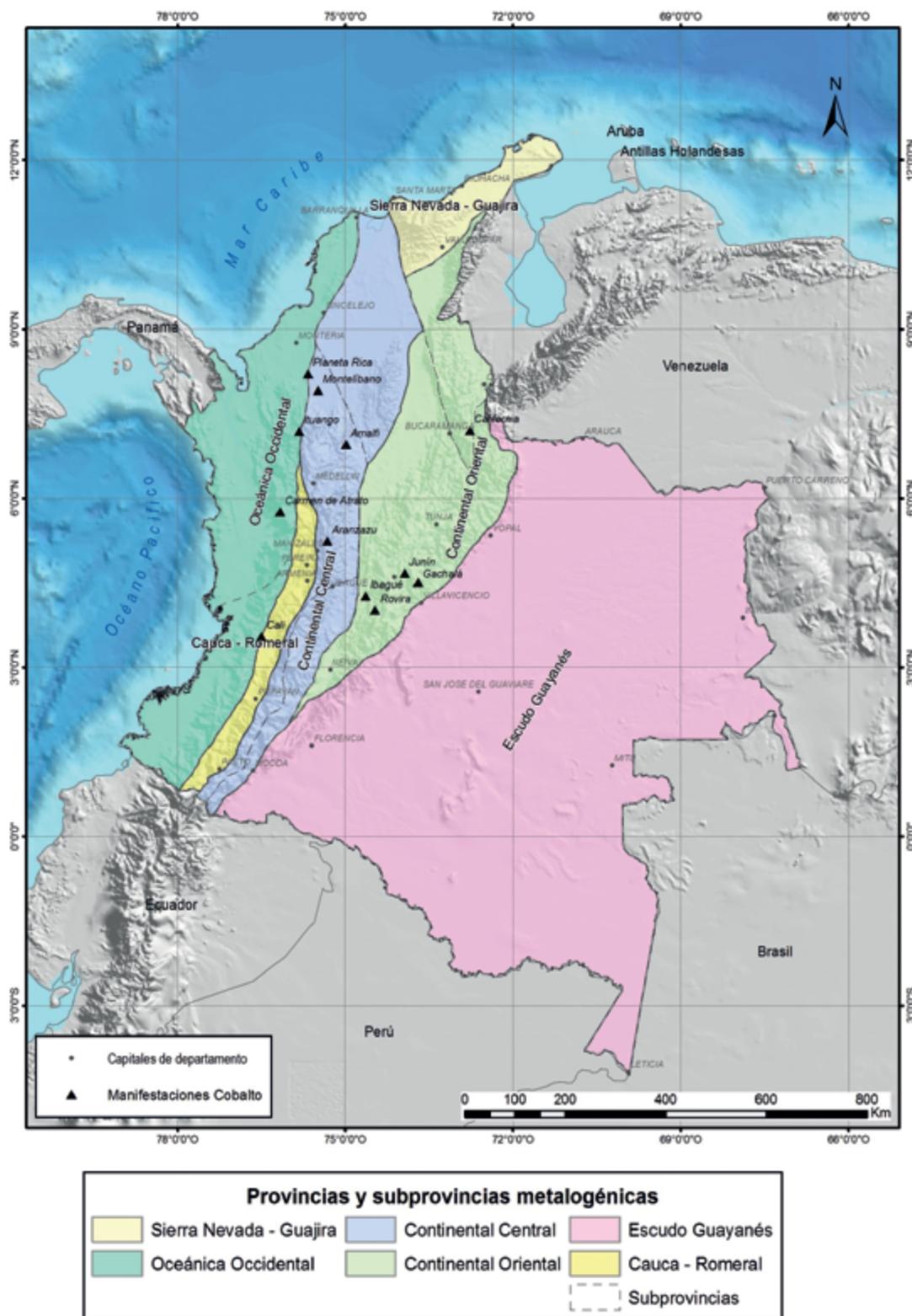
#### 3.2. Geología local

El catálogo elaborado por Mutis (1983) registra la presencia de cobalto en el departamento de Cundinamarca, en los municipios de Gachalá y de Junín; en el departamento del Quindío, en Salento; en el departamento del Tolima, en Rovira, y en el departamento del Valle, en Vijes (figura 10).

En la región costa Pacífica el cobalto se obtiene como subproducto (Álvarez, 1987) en el departamento del Chocó, en la mina El Roble, ubicada a 4 km al norte del municipio de Carmen de Atrato, la cual Calle y Salinas (1986) clasificaron como un depósito de sulfuros masivos de Cu-Au-Ag, y en la mina La Equis, al este del corregimiento

de Tutunendo del municipio de Quibdó. Estos autores plantean dos hipótesis para explicar su origen: hidrotermal

o exhalativo submarino de secuencia incompleta de sulfuros masivos tipo Kuroko de Zn-Pb-Au-Ag.



**Figura 10.** Mapa de manifestaciones de cobalto  
Fuente: Mutis (1983), Álvarez, 1987 y Calle y Salinas (1986)

En la Cordillera Central Álvarez (1987) también menciona la mina La Bramadora, en el departamento de Antioquia, y “algunas explotaciones aisladas de sulfuros en los departamentos de Cauca y Nariño” (p. 119). En el distrito minero de Vetas y California en Santander los minerales de mena están relacionados con oro y plata en asociaciones minerales de cuarzo, pirita, calcopirita, arsenopirita, galena, esfalerita y tetraedrita. En algunas minas se observa uraninita (Lozano y Pulido, 1986).

El cobalto en lateritas níquelíferas está plenamente comprobado en los municipios de Montelíbano, Uré y Planeta Rica del departamento de Córdoba. En la actualidad y desde el 2015 la empresa South 32 (antes la angloaustraliana BHP Billiton) explota la mina de Cerromatoso en Montelíbano, la cual lo obtiene como subproducto del procesamiento del ferroníquel. Álvarez (1987) señala, al referirse a este depósito, que cuenta “con unos 60 millones de toneladas de mineral de 0.05 % promedio de cobalto, valor muy aproximado” (p. 119); sobre las de Planeta Rica, indica que el “promedio aproximado en cobalto es de 0.03 %” (p. 119).

### 3.3. Situación actual de la minería

En Colombia el cobalto no se explota directamente. Lo que se puede obtener proviene como subproducto o coproducto del procesamiento de las lateritas níquelíferas de Cerromatoso o de los concentrados de cobre, que no han sido publicados. La demanda del mercado se satisface con importaciones.

#### 3.3.1. Potencial

Los recursos relacionados con el cobalto no se han divulgado; no se conocen en el país depósitos exclusivos de este mineral. Sin embargo, a la fecha, en los registros de la

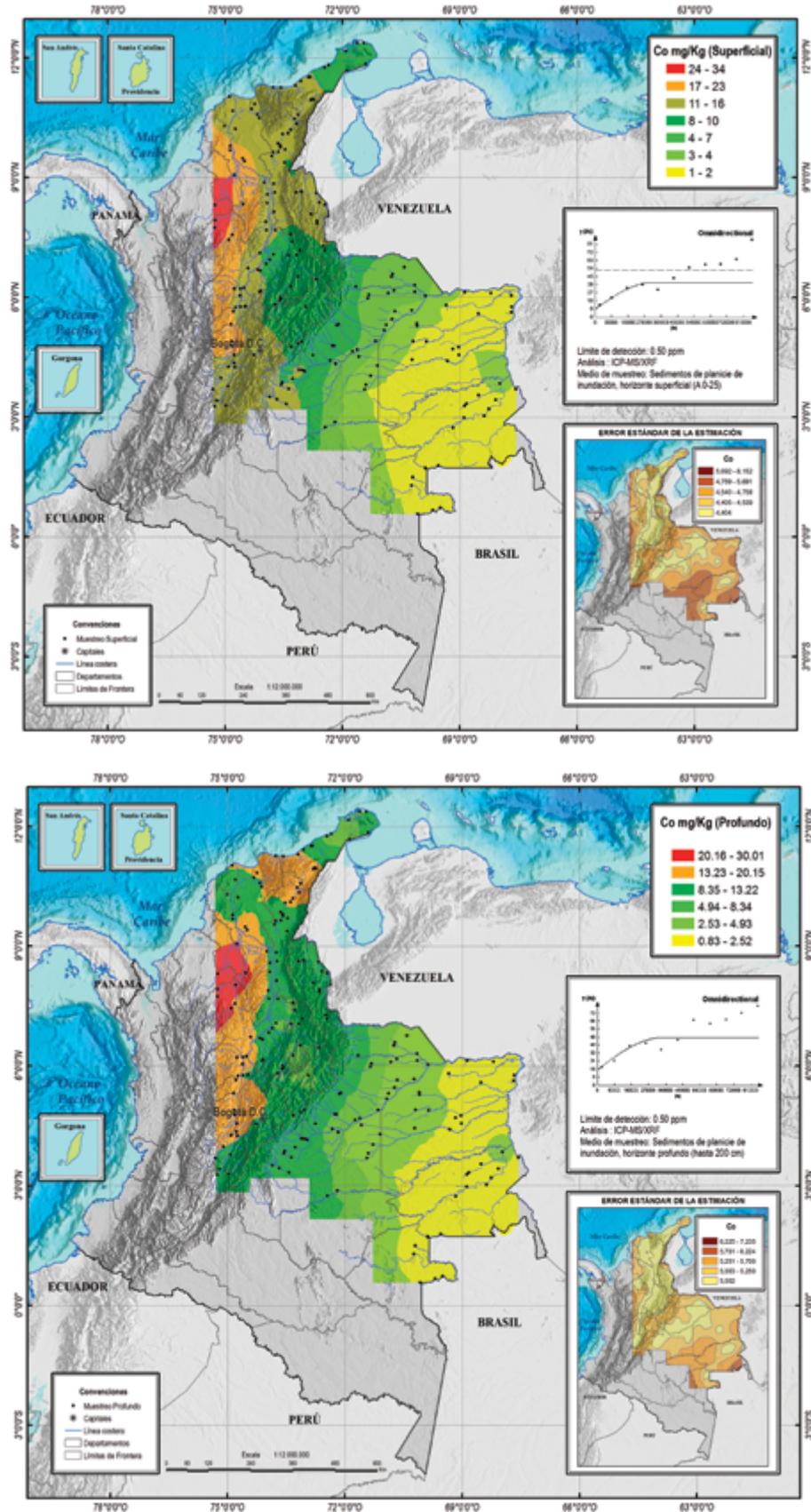
Agencia Nacional de Minería (ANM y CMC, s.f), existen dos (2) títulos vigentes en etapa de explotación con cobalto entre los minerales a concesionar, los cuales se encuentran localizados en los departamentos de Córdoba y Tolima; con respecto a solicitudes mineras se reportan dos (2) vigentes en los departamentos de Antioquia y Cauca, y una solicitud de legalización en Bolívar.

La potencialidad minera de cobalto en Colombia está relacionada directamente con las lateritas níquelíferas, donde los minerales de cobalto son subordinados. Actualmente la empresa South 32 explota una de estas mineralizaciones en el área de Cerromatoso, departamento de Córdoba, operación que es una de las mayores del mundo en producción de ferroníquel de alta pureza y cuya concesión está autorizada hasta el 2029.

Colombia no cuenta con registros de producción de cobalto; sin embargo, en productos como el concentrado de cobre y el ferroníquel pueden existir contenidos de cobalto en niveles bajos, y puede extraerse como subproducto durante la refinación de los concentrados mencionados.

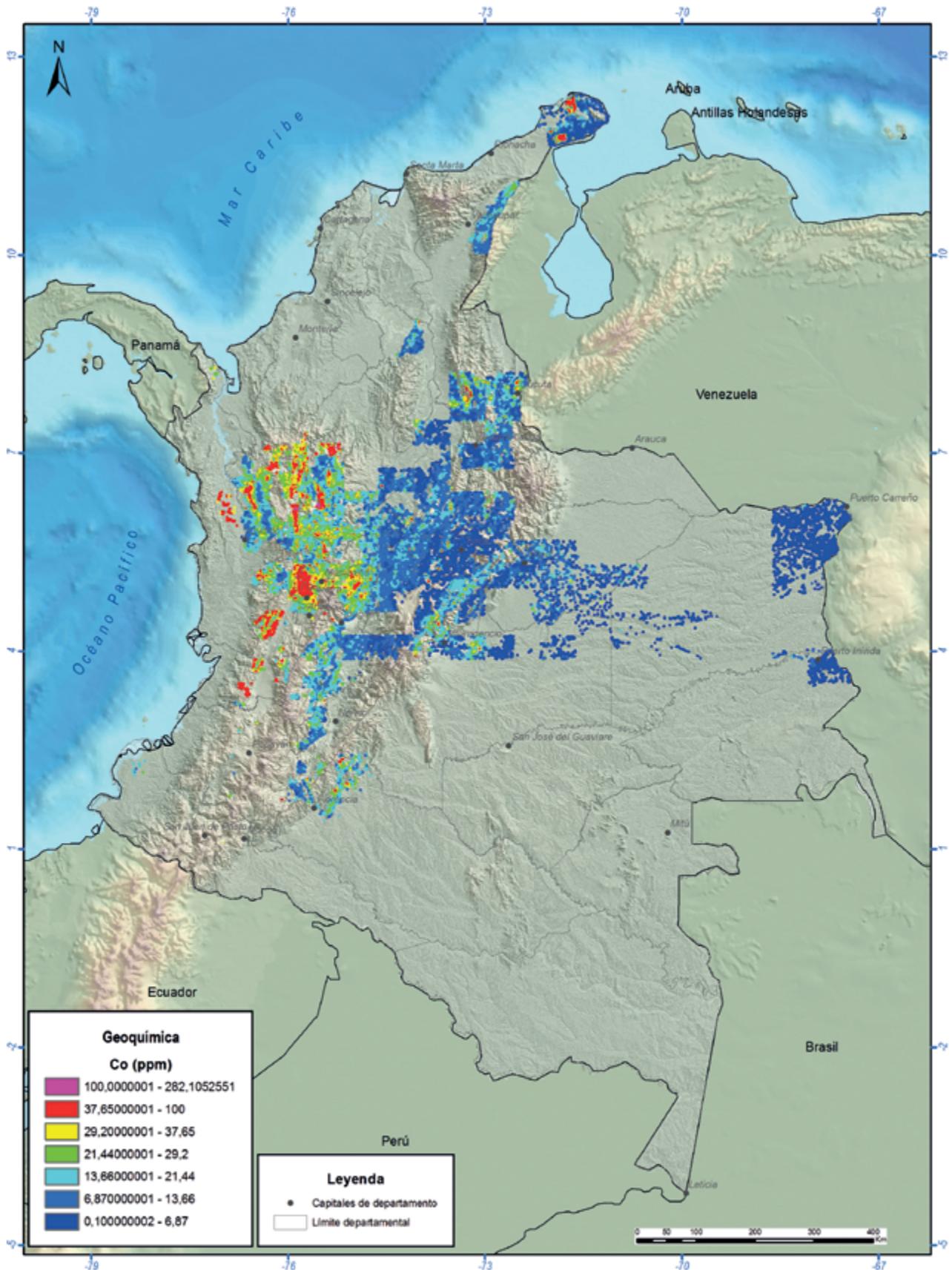
En el 2005 Ingeominas publicó el *Atlas geoquímico de Colombia-Mapeo de ultra baja densidad (UBD)*, que fue realizado en las zonas Andina, Caribe, Orinoquía y Amazonía; en las grandes cuencas hidrográficas allí presentes, con relación al cobalto, se muestra en la figura 11 su distribución espacial y las anomalías presentes, confirmando lo enunciado sobre la existencia de las zonas anómalas en el departamento de Córdoba (Prieto y García, 2005).

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publica el Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2016, con el cubrimiento aproximado del 35% del país; para el Cobalto se basó en su concentración en sedimentos mg/kg de 30.405 registros analizados (SGC, 2016) (figura 12).



**Figura 11.** Distribución geoquímica del cobalto en Colombia

Fuente: Prieto y García (2005)



**Figura 12.** Distribución geoquímica del cobalto en Colombia

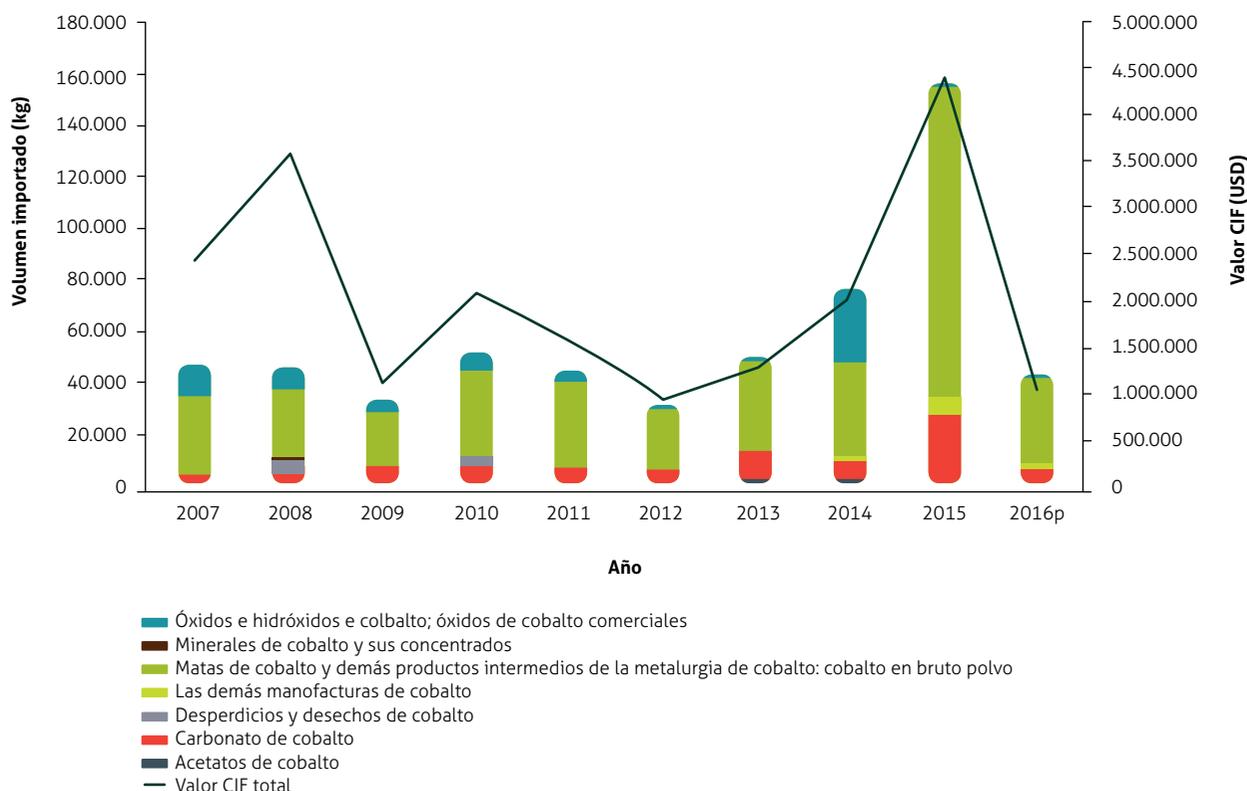
Fuente: SGC (2016)

### 3.3.2. Comercio

La demanda nacional se satisface con importaciones, controladas y restringidas por el Gobierno nacional en cualquiera de sus formas. Las exportaciones en la actualidad se hacen de manera indirecta, debido a que seguramente el elemento se obtiene como subproducto de la refinación de concentrados de sulfuros de Cu o del ferróniquel que se exporta. En los anuarios de Comercio Exterior del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2016), correspondientes al periodo 2007-2016 (figura 13), Colombia importó cobalto en sus presentaciones de acetato de cobalto, carbonato de cobalto, minerales de cobalto y sus concentrados, óxidos e hidróxidos de cobalto comerciales y sus concentrados, óxidos e hidróxidos de cobalto comerciales, entre otros. En la figura se muestran los totales anuales, discriminando la participación de los diferentes productos importados, de donde se deduce que las importaciones colombianas de cobalto son fluctuantes, con un crecimiento importante entre el 2014 y el 2015.

El valor CIF (por sus siglas en inglés, Cost, Insurance and Freight) en dólares de las importaciones en el 2015 ascendió a USD \$4.500.000, año en el cual se alcanzó el pico más alto de las importaciones, aprovechando los precios bajos del mercado. Situación contraria ocurrió en el 2008, cuando se presentó un incremento en el valor CIF de las importaciones, a pesar de ser bajo el volumen importado, lo cual se explica por los altos niveles de precios que se presentaban en ese entonces (triplicaban los del 2015).

Las estadísticas sobre producción minera nacional, en lo referente a minerales metálicos que administra el Gobierno nacional, solo reportan los grupos Ni contenido en ferróniquel y cobre (concentrados). Por tanto, los volúmenes de producción de cobalto en Colombia se desconocen; de existir, provienen como subproducto o coproducto del procesamiento de las lateritas niquelíferas de Cerromatoso en Montelíbano (Córdoba) y de los concentrados de cobre.



**Figura 13.** Importaciones colombianas de cobalto en sus distintas presentaciones, 2007-2016

Fuente: DANE (2016)

Cerro Matoso es la de mina de níquel más grande de Latinoamérica, produce cerca de 350.000 libras de níquel por día, convirtiéndose en el primer produc-

tor de este mineral en América Latina, superando a Cuba y Brasil y ocupa el 8° puesto a nivel mundial (Bermudez *et al.*, 2012).

#### 4. Aspectos ambientales y sustitutos

En lo referente al tema ambiental, el estudio del ciclo de las rocas y los minerales, en relación con el sistema biótico (seres humanos, animales y plantas), ha dado lugar a una ciencia interdisciplinaria nueva o especialidad emergente (Selinus, 2004) llamada geología médica, que incluye los procesos del ciclo de investigación-explotación minera, con el propósito de conocer la relación entre los factores geológicos y la salud, para entender la influencia que los factores ambientales comunes tienen en la distribución geográfica de los problemas de salud.

Con base en esta nueva disciplina se han estudiado detenidamente el cobalto y sus minerales. Se ha observado que el cobalto tiene efectos beneficiosos o perjudiciales para la salud animal, humana y no humana. Es beneficioso porque forma parte de la vitamina B<sub>12</sub>, esencial para mantener buena salud; es perjudicial cuando el cuerpo absorbe demasiado cobalto, lo que produce dificultades para respirar, asma y daños graves en los pulmones (ATSDR, 2004). Por otra parte, su carencia produce avitaminosis y, en dosis diarias de 25 mg o más, el cobalto es tóxico.

La exposición al cobalto radiactivo puede ser muy peligrosa para la salud; por este motivo se clasifica como sustancia peligrosa y se le considera precursor carcinogénico. El cobalto afecta los sistemas glandular y cardiovascular.

La deficiencia del cobalto en los suelos agrícolas es un problema creciente; un suelo se considera deficiente en cobalto cuando cuenta con proporciones menores a 5 mg/kg; al usar fertilizantes ricos en cobalto pueden remediarse estas deficiencias, pero un uso en exceso puede resultar en una deficiencia de Fe y Cu (Reimann y de Caritat, 1998).

Las perspectivas políticas, en lo que atañe a este metal en el aspecto ambiental, son de incremento en los controles. A partir del 1° de junio del 2007 en los países de la Unión Europea se aplica la norma Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals (REACH), aprobada por la Comisión Europea desde el 29 de octubre del 2003, que involucra a todos los productores e importadores de materiales químicos, incluido el cobalto, con mercado en los países de la Unión (European Commission, 2007).

Por virtud de esta norma los productores e importadores deben coleccionar y suministrar datos sobre las propiedades de las sustancias químicas (expediente técnico), y se les obliga a registrarlos en una base de datos centralizada a cargo de la Agencia Europea de Sustancias y Preparados Químicos, cuando las cantidades producidas o importadas sean iguales o superiores a una tonelada. A partir de las diez toneladas se les exige la presentación de un informe sobre la seguridad química en la que se basan las medidas adoptadas para la gestión de los riesgos.

La norma propende, por un lado, por proteger la salud humana y el ambiente a través de la mejor y temprana identificación de las propiedades químicas de las sustancias y preparados, mediante un conocimiento adecuado de estos y, por otro, garantizar que los riesgos que dichas sustancias puedan representar se gestionen de manera responsable, basándose en información fidedigna. Al mismo tiempo, será reconocida la capacidad innovativa y el grado de competitividad de las industrias químicas de la Unión Europea y hace un llamado para la progresiva sustitución de los químicos más peligrosos cuando hayan sido identificadas alternativas disponibles en el mercado.

En cuanto a la sustitución del cobalto, en la mayoría de las aplicaciones donde se ha efectuado por lo general causa una pérdida en el desempeño del producto. Los sustitutos potenciales (USGS, 2016) incluyen ferritas de bario o de estroncio, neodimium-hierro-boro o níquel-hierro en imanes; níquel o cerámicas en materiales resistentes al uso o en cortadoras; aleaciones con base en níquel o de cerámica en motores de avión a propulsión; níquel en catalizadores del petróleo; cobalto-manganeso-níquel en baterías ion-litio, y cerio, hierro, plomo, manganeso o vanadio en pinturas. Las industrias de las baterías y de los carburos que usan ampliamente el cobalto en sus productos realizan serios y numerosos estudios de investigación y desarrollo, con el principal objetivo de encontrarle sustituto, debido a los altos precios y a la incertidumbre en el lado de los suministros del mercado en el futuro próximo (inestabilidad política).

## Referencias

- Aguilar Malavia, J. M. (1999). *Historia del cobalto*. Disponible en <http://www.uv.es/~jaguilar/elementos/co.html>
- Álvarez, E. (1987). Minerales metálicos. Minerales de Cobalto. En *Recursos minerales de Colombia*. Tomo I. Bogotá: Ingeominas.
- Agencia Nacional de Minería (ANM) y Catrasto Minero Colombiano (CMC). (s.f). *Consulta de expedientes*. Disponible en: <http://www.cmc.gov.co:8080/CmcFrontEnd/consulta/busqueda.cmc>. Bogotá: ANM, CMC
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2004). *Resúmenes de salud pública - Cobalto (Cobalt)*. Disponible en [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs33.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs33.html)
- Audion, A. S., Hocquard, C., Labbé, J. F., y Dupuy, J. J. (2014). Panorama mondial 2013 du marché du cobalt. *Rapport public. BRGM/RP-63626-FR*. Disponible en <http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Plaquettes-rp-63626-fr-cobalt.pdf>
- Barthelmy, D. (2007). Dana Classification. Disponible en <http://webmineral.com/danaclass.shtml>
- Bermudez, G; Arango, M, Rodríguez, G, García, G y Ramírez, C. (2012). *Cartografía geológica de las planchas 72 Pueblo Nuevo y 82 Montelibano (Departamento de Córdoba)*. Medellín: Ingeominas
- Brook, M. (1984). *New radiometric age data from S. W. Colombia*. Cali: Ingeominas-British Geological Survey.
- Calle, B. y Salinas, R. (1986). *Geología y geoquímica de la Plancha 165 Carmen de Atrato*. Bogotá: Ingeominas
- Cobalt Development Institute. (2017). *Cobalt Institute. Promoting the sustainable and responsible use of cobalt in all forms*. Disponible en <https://www.cobaltinstitute.org/>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2016). *Estadística de importaciones*. Disponible en websiex.dian.gov.co
- European Commission. (2007). *European Commission. REACH Pre-registration & Registration - Questions and Answers*. Disponible en [http://europa.eu/rapid/press-release\\_MEMO-08-240\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-08-240_en.htm)
- Gómez, T., Nivia, G., Jiménez, M., Montes, R., Sepúlveda, O., Osorio, N. et al. (2006). *Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Hamilton, E. I. (1994). The geobiochemistry of cobalt. *Science of The Total Environment*, 150(1-3), 7-39. Disponible en [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V78-48XV2W0-Y6&\\_user=10&\\_coverDate=06%2F30%2F1994&\\_rdoc=4&\\_fmt=summary&\\_orig=browse&\\_srch=docinfo\(%23toc%235836%231994%23998499998%23437994%23FLP%23display%23Volume\)&\\_cdi=5836&\\_sort=d&\\_docanchor=&](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V78-48XV2W0-Y6&_user=10&_coverDate=06%2F30%2F1994&_rdoc=4&_fmt=summary&_orig=browse&_srch=docinfo(%23toc%235836%231994%23998499998%23437994%23FLP%23display%23Volume)&_cdi=5836&_sort=d&_docanchor=&)
- Höy, T. (1995). Noranda/Kuroko Massive Sulphide Cu-Pb-Zn. En *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*, Vol. 1, Open File 1995-20. British Columbia: Ministry of Energy of Employment and Investment.
- Iturralde-Vinent, M. (2009). *Geología de Cuba para todos*. La Habana: Científico-Técnico. Disponible en [http://www.redciencia.cu/cdorigen/arca/paper/2009\\_Iturralde\\_GeoCubaParaTodosFormat\\_preview.pdf](http://www.redciencia.cu/cdorigen/arca/paper/2009_Iturralde_GeoCubaParaTodosFormat_preview.pdf)
- Lefebure, D. (1996). I - Vein, Breccia, and Stockwork. *British Columbia, Ministry of Energy and Mines*. Disponible en <http://www.empr.gov.bc.ca/Mining/Geoscience/MineralDepositProfiles/ListbyDepositGroup/Pages/IVeinBrecciaStockwork.aspx#i14>
- Lozano, Q. H. (1986). Oro y plata en Colombia-Áreas prometedoras. *I Taller latinoamericano sobre la exploración y explotación del oro aluvial*. Bogotá: Ingeominas
- Lozano, Q. y Pulido, O. (1986). Situación actual de la minería del oro y la plata en Colombia. *Boletín Geológico* 27(3), 6-56.
- Mohammed, B., Lhou, M., Gilles, L., y Saddiqi, O. (2016). The Bou Azzer Co-Ni-Fe-As( $\pm$ Au  $\pm$  Ag) District of Central Anti-Atlas (Morocco): A Long-Lived Late Hercynian to Triassic Magmatic-Hydrothermal to Low-Sulphidation Epithermal System. En M. Bouabdellah y J. Slack (Eds.), *Mineral Deposits of North Africa. Mineral Resource Reviews*. (pp. 229-247). Berlin: Springer. Disponible en [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-31733-5\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-31733-5_8)
- Murillo, R. A. (1987). Minerales metálicos. Niobio y Tantalio. En *Recursos minerales de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Mutis, J. (1983). *Catálogo de los yacimientos, prospectos y manifestaciones minerales de Colombia*. Publicación especial n.º 13. Bogotá: Ingeominas.
- Nivia, G. (2001). *Mapa geológico del departamento del Valle escala 1:250.000*. Memoria explicativa. Bogotá: Ingeominas.
- Prieto, G. y García, G. (2005). *Atlas geoquímico de Colombia-Mapeo de ultra baja densidad (UBD)*. Bogotá: Ingeominas.
- Reimann, C. y Caritat, P. (1998). *Chemical elements in the environment - Factsheets for the geochemist and environmental scientist*. Berlín: Springer-Verlag.
- Rubio, G. (2003). *Monografía de mienrales de cobalto en España*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Serie Recursos Minerales 4. Disponible en <https://dokumen.tips/documents/monografia-sobre-recursos-minerales-de-cobalto-en-espana.html>. Madrid: IGME.
- Smartminerals. (2017). *The Bou Azzer Co - Ni Mining Complex*. Disponible en [www.smartminerals.com/morocco2004/articoli/marocco\\_bou\\_azzer\\_ingl.htm](http://www.smartminerals.com/morocco2004/articoli/marocco_bou_azzer_ingl.htm)
- United Nations (UN). (1997). *Classification for Reserves/Resources-Solid Fuels and Mineral Commodities of 1997. International Framework*. Nueva York.

- United Nations (UN). (2001). *Guidelines to the United Nations International Framework Classification for Reserves/Resources-Solid Fuels and Mineral Commodities*. Nueva York: UN-ECE Committee on Sustainable Energy.
- United States Geological Survey (USGS). (2016). *Cobalt*. Disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cobalt/mcs-2016-cobal.pdf>
- Wang, S. (2006). *Cobalt-Its Recovery, Recycling, and Application*. The Minerals, Metals and Materials Society. Disponible en <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0610/wang-0610.html>
- Wedephol, K. H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217-1239.
- Worldatlas.com. (2016). World Map Mercator Projection No Borders in North America. *Worldatlas.com*. Disponible en <http://www.worldatlas.com/aatlas/wrldnanb.htm>